

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

4(67)



Видавничий дім
«Гельветика»
2026

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Морозова Т. В. – К. : Видавничий дім «Гельветика», 2026. – № 4(67). – 264 с.

Головний редактор: Морозова Тетяна Василівна, доктор біологічних наук, доцент, вчений секретар, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», Україна

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

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

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

Журнал включений до Переліку наукових фахових видань України
відповідно до Наказу МОН України № 928 від 11 червня 2026 року (додаток 5)
строком на три роки з 01 червня 2026 року по 31 травня 2029 року з присвоєнням категорії «Б».
Кластер: Науки про Землю та навколишнє середовище.
Спеціальності: E2 Екологія, E4 Науки про Землю.

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

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

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

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

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА.....	9
Бондар О.І., Четвериков В.В., Риженко Н.О., Любимов А.Ф. Забруднення довкілля стійкими органічними забруднювачами внаслідок військових дій.....	9
Гетьман Б.А., Волошина Н.О. Порівняльний аналіз стандартів і процедур оцінки відповідності обладнання для потенційно вибухонебезпечних пилових середовищ в Україні та ЄС.....	15
Муха Р.Б., Гнєзділова В.І. Екологічна дисфункція цифрової екосистеми в умовах розвитку штучного інтелекту: екосистемний підхід до аналізу інформаційного перевантаження.....	20
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА БІОРІЗНОМАНІТТЯ.....	26
Некос А.Н., Добровольський О.С. Природно-заповідний фонд України в контексті екологічної безпеки, збереження біорізноманіття та повоєнного відновлення.....	26
Парахненко В.Г., Гончарук В.В., Мандебура С.В. Екологічна токсикологія як методологічна основа оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем і зниження антропогенного навантаження на довкілля.....	32
ЕКОЛОГІЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ.....	38
Грабко Н.В., Колісник А.В. Низький ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі як складова ризику для здоров'я людини в регіонах Західної України.....	38
ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ.....	46
Бережнюк Є.М., Богданець В.А., Бровко Д.Ю. Виявлення порушень ґрунтового покриву та розвитку ерозії ґрунту Великописарівської територіальної громади Сумської області внаслідок військових дій.....	46
Руденко С.В., Руденко В.П. Земельні ресурси як домінуюча та субдомінуюча складові природно-ресурсного потенціалу екосистем України.....	57
ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....	63
Бобков М.О., Піщіль А.О. Моніторинг показників якості питної води у системі централізованого водопостачання м. Житомир за 2020–2025 рр.	63
Залізняк Я.І. Геосистемний підхід до охорони річкових екосистем: технології виявлення та мінімізації негативних впливів.....	70
Новікова А.М. Роль підземних вод у забезпеченні сталого водокористування Харківської області в умовах дефіциту водних ресурсів.....	76
Оліниченко Ю.О., Білик Т.І., Явнюк А.А. Зменшення водного сліду та евтрофікації водойм при переході на сонячну енергетику медичного закладу.....	83
ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ.....	89
Калин Б.М. Антропогенна трансформація та нормативно-кадастрові колізії водоохоронних зон в Україні (на прикладі Львівської області).....	89
Кратюк О.Л., Власюк В.П., Бондарчук Н.В. Розвиток мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин як складової організаційної структури мисливськогосподарського виробництва Житомирської області.....	94
ЕКОЛОГІЯ ЕКОСИСТЕМ.....	101
Волошин В.С. Зворотний інформаційний зв'язок як фактор співвідношення індивідуального та колективного в популяційних екосистемах.....	101
Гулай В.В. Особливості екологічних взаємодій між представниками відділу мохоподібні та патогенними лептоспірами в умовах перезволожених земель.....	110
Сімчук А.П., Сіренко А.Г. Sphecidae та Crabronidae (Apoidea, Hymenoptera, Insecta) субальпійського поясу Українських Карпат.....	115

Ткачук О.П., Мазур О.В. Наукові принципи підбору декоративних рослин в урбоєкосистемах для забезпечення природоохоронних функцій.....	120
Хижняк С.В., Корнієнко В.І., Войціцький В.М., Коверсун І.В., Дудченко Н.Я. Рослини як чинник надійності наземних екосистем та їхнє значення для біоіндикації та біотестування забруднення довкілля.....	126
ЕКОЛОГІЯ ТЕРИТОРІЙ СМАРАГДОВОЇ МЕРЕЖІ.....	131
Федонюк В.В., Панькевич С.Г. Аспекти сучасного стану та екологічної безпеки територій Смарагдової мережі в межах Прип'яті та Стоходу.....	131
АГРОЕКОЛОГІЯ.....	136
Лоза В.В., Назаренко М.М. Дія фенілзаміщених похідних на фотосинтетичний апарат агроценозів пшениці.....	136
Юрченко Т.В., Пикало С.В., Гудзенко В.М., Кузьменко Є.А., Пірич А.В. Спосіб оцінки морозостійкості зернових культур на різних етапах органогенезу рослин.....	141
ЕКОЛОГІЯ УРБАНІЗОВАНИХ ЕКОСИСТЕМ.....	147
Владимирова О.Г., Тимошук М.О., Гарабазій Т.А., Бургаз О.А. Статистичні закономірності просторового розподілу NO ₂ в урбанізованому середовищі (на прикладі м. Одеса).....	147
Сакун А.О., Кутковий Д.О. Військові дії як чинник деградації урбанізованих екосистем.....	152
ЕКОЛОГІЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ.....	157
Вознюк Я.Ю. Еко-технологічна зрілість транспортних підприємств як нова наукова категорія екологічного менеджменту.....	157
ЕКОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	162
Дмитрук Д.О. Моделювання зв'язку між забрудненням ґрунту та накопиченням ¹³⁷ Cs дикорослими грибами на території Полісся.....	162
Tkach V., Morozova T., Isabel O'Neill Gaivão, José Inácio Ferrão da Paiva Martins. Mathematical modeling of the electrochemical determination of fipronil using a composite sensor based on triazolic Schiff bases and vanadium(III) oxyhydroxide.....	167
ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ.....	174
Дубровський В.Ю., Мудрак О.В. Застосування геоінформаційних технологій для просторової верифікації ключових територій проєктованої екомережі Кіровоградської області.....	174
Іващенко І.В., Рахметов Д.Б. Біохімічний склад фітосировини однорічних і багаторічних рослин-інтродуцентів родини <i>Asteraceae</i> в умовах Полісся України.....	183
Маслов І.В., Внукова Н.В., Маслова Н.М. Теоретичні засади оцінки екологічності довкілля за показниками акустичного навантаження.....	192
Терещенко Н.Ю. Навчальний кейс як інструмент формування компетентностей сталого розвитку.....	198
Шевченко Р.Ю. Науково-практичні основи еколого-освітньої роботи у туристсько-рекреаційних дестинаціях та зеленій інфраструктурі (на прикладі окремих установ ПЗФ міста Києва).....	205
МОНІТОРИНГ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ.....	210
Бондарчук Ю.В., Мельник-Шамрай В.В. Сучасні методи моніторингу лісових екосистем України: стан, проблеми та перспективи розвитку.....	210
МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ.....	219
Бутенко О.Г., Васютинська К.А., Мельник С.В., Озернюк Г.В., Кубко В.П., Бизова М.Б., Даниленко Т.М. Воєнний екоцид в Україні: національні підходи та міжнародний досвід еколого-правової й економічної оцінки шкоди довкіллю.....	219

ЗМІНА КЛІМАТУ	227
Буяльська Н.П., Костенко І.А., Орда Б.Є., Цибуля С.Д., Челябієва В.М. Стратегія адаптації харчової промисловості України до зміни клімату.....	227
Коваленко Ю.Л., Дмитренко Т.В. Оцінка впливу зміни клімату на суму активних температур до дати останнього весняного заморозку в містах України.....	233
Шевченко О.В., Ковальчук І.П., Опенько І.А., Пронь О.С., Тихенко Р.В. Вплив змін клімату на геоекологічний стан і функціонування річкових систем та озер Поліського регіону.....	243
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ	251
Філін В.В., Улицький О.А., Фролов В.Ф. Методологічні засади впровадження та масштабування цифрової E-Waste платформи в системі управління відходами України в контексті європейської інтеграції.....	251
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ	259

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY	9
Bondar O., Chetverykov V., Ryzhenko N., Liubimov A. Environmental Pollution by Persistent Organic Pollutants as a Result of Military Activities.....	9
Hetman B., Voloshyna N. Comparative analysis of standards and procedures for conformity assessment of equipment for potentially explosive dust environments in Ukraine and EU.....	15
Mukha R., Gniezdilova V. Ecological dysfunction of the digital ecosystem under the development of artificial intelligence: an ecosystem approach to the analysis of information overload.....	20
ENVIRONMENTAL SAFETY OF BIODIVERSITY	26
Nekos A., Dobrovolskyi O. Nature reserve fund of Ukraine in the context of environmental safety, biodiversity conservation and post-war recovery.....	26
Parakhnenko V., Goncharuk V., Mandebura S. Environmental toxicology as a methodological foundation for assessing the impact of bio-organic farming on the environmental safety of agroecosystems and reducing anthropogenic environmental impact.....	32
ECOLOGY OF ATMOSPHERIC AIR	38
Hrabko N., Kolisnyk A. Low mass concentration of oxygen in atmospheric air as a risk for human health in the regions of Western Ukraine.....	38
ECOLOGY OF LAND RESOURCES	46
Berezhniak Ye., Bogdanets V., Brovko D. Detection of disturbances of the soil cover and soil erosion development of the Velyka Pysarivka territorial community of Sumy region as a result of military actions.....	46
Rudenko S., Rudenko V. Land resources as dominant and subdominant components of nature-resource potential of ecosystems of Ukraine.....	57
ECOLOGY OF WATER RESOURCES	63
Bobkov M., Pitsil A. Monitoring of Drinking Water Quality Indicators in the Centralized Water Supply System of Zhytomyr for 2020–2025.....	63
Zalizniak Ya. Geosystem-Based Approach to River Ecosystem Conservation: Technologies for Identifying and Minimizing Anthropogenic Impacts.....	70
Novikova A. The Role of Groundwater in Ensuring Sustainable Water Use in the Kharkiv Region under Conditions of Water Resource Scarcity.....	76
Olinechenko Yu., Bilyk T., Yavniuk A. Reducing the water footprint and water body eutrophication during a medical facility's transition to solar energy.....	83
ECOLOGY OF NATURAL RESOURCES	89
Kalyn B. Anthropogenic transformation and regulatory-cadastral collisions of water protection zones in Ukraine (case study of Lviv region).....	89
Kratiuk O., Vlasiuk V., Bondarchuk N. Development of the Network of Semi-Free-Ranging Game Animal Enclosures within the Organizational Structure of Hunting Management in Zhytomyr Region.....	94
ECOSYSTEM ECOLOGY	101
Voloshyn V. Feedback as a Factor in the Relationship between Individualism and Collectivism in Population Ecosystems.....	101
Hulai V. Peculiarity of ecological interactions among representatives of Bryophyta and pathogenic leptospire in the conditions of wetlands territories.....	110
Simchuk A., Sirenko A. Sphecidae and Crabronidae (Apoidea, Hymenoptera, Insecta) of the subalpine belt of the Ukrainian Carpathians.....	115

Tkachuk O., Mazur O. Scientific principles of selection of ornamental plants in urban ecosystems to provide natural protection functions.....	120
Khyzhniak S., Korniienko V., Voitsitskyi V., Koversun I., Dudchenko N. Plants as a factor in the reliability of terrestrial ecosystems and their importance for bioindication and biotesting of environmental pollution.....	126
ECOLOGY OF EMERALD NETWORK SITES.....	131
Fedoniuk V., Pankevich S. Aspects of the current status and environmental safety of the Emerald Network areas in the Pripyat and Stokhod river basin.....	131
AGROECOLOGY.....	136
Loza V., Nazarenko M. The effect of phenyl-substituted derivatives on the photosynthetic apparatus of wheat agrocenoses.....	136
Yurchenko T., Pykalo S., Hudzenko V., Kuzmenko Ye., Pirykh A. Method for assessing frost tolerance of cereal crops at different stages of plant organogenesis.....	141
ECOLOGY OF URBAN ECOSYSTEMS	147
Vladymyrova O., Timoshchuk M., Garabagii T., Burhaz O. Statistical patterns of the spatial distribution of NO ₂ in an urban environment (using the city of Odesa as an example).....	147
Sakun A., Kutkovyi D. Military actions as a factor of urban ecosystem degradation.....	152
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT.....	157
Vozniuk Ya. Eco-technological maturity of transport enterprises as a new scientific category of environmental management.....	157
ECOLOGICAL MODELING.....	162
Dmytruk D. Modelling the relationship between soil contamination and ¹³⁷ Cs accumulation in wild mushrooms on the territory of Polissia.....	162
Tkach V., Morozova T., Isabel O’Neill Gaivão, José Inácio Ferrão da Paiva Martins. Mathematical modeling of the electrochemical determination of fipronil using a composite sensor based on triazolic Schiff bases and vanadium(III) oxyhydroxide.....	167
THEORETICAL ECOLOGY.....	174
Dubrovsky V., Mudrak O. Application of geoinformation technologies for spatial verification of key areas of the designed econetwork of Kirovograd region.....	174
Ivashchenko I., Rakhmetov D. Biochemical composition of phytoraw materials of annual and perennial introduced plants of the Asteraceae family in the conditions of Polissya, Ukraine.....	183
Maslov I., Vnukova N., Maslova N. Theoretical foundations for assessing environmental ecology based on acoustic load indicators.....	192
Tereshchenko N. Educational case as an instrument for developing sustainable development competences.....	198
Shevchenko R. Scientific and practical foundations of ecological-educational work in tourist and recreational destinations and green infrastructure (based on selected of Nature Protected Areas of the city of Kyiv).....	205
MONITORING OF FOREST ECOSYSTEMS	210
Bondarchuk Yu., Melnyk-Shamrai V. Modern methods of monitoring forest ecosystems in Ukraine: current state, challenges and development prospects.....	210
MONITORING ENVIRONMENTAL IMPACTS OF MILITARY ACTIONS.....	219
Butenko O., Vasiutynska K., Melnyk S., Ozerniuk H., Kubko V., Byzova M., Danylenko T. Wartime ecocide in Ukraine: national approaches and international experience in the legal, environmental, and economic assessment of environmental damage.....	219

CLIMATE CHANGE	227
Buialska N., Kostenko I., Orda B., Tsybulia S., Cheliabieva V. Strategy for adaptation of the food industry of Ukraine to climate change.....	227
Kovalenko Yu., Dmytrenko T. Assessing the impact of climate change on the sum of active temperatures before the date of the last spring frost in Ukrainian cities.....	233
Shevchenko O., Kovalchuk I., Openko I., Pron O., Tykhenko R. The impact of climate change on the geoecological state and functioning of river systems and lakes of the Polissia region.....	243
WASTE MANAGEMENT	251
Filin V., Ulytskyi O., Frolov V. Methodological framework for the implementation and scaling of the digital E-Waste platform in Ukraine's waste management system in the context of European integration.....	251
AUTHORS' CREDENTIALS	259

ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ СТІЙКИМИ ОРГАНІЧНИМИ ЗАБРУДНЮВАЧАМИ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Бондар О.І.¹, Четвериков В.В.², Риженко Н.О.¹, Любимов А.Ф.¹

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²Інститут газу Національної академії наук України
вул. Дегтярівська, 39, 03113, м. Київ
erdu@ukr.net, chvvingas@gmail.com

Вивчено вплив військових дій на формування нових джерел та зміну обсягів емісії стійких органічних забруднювачів (СОЗ) в Україні. Зазначено, що руйнування об'єктів накопичення СОЗ, зокрема складів заборонених пестицидів та електро-технічного обладнання, наповненого поліхлорованими дифенілами (ПХД), призводить до їх неконтрольованого потрапляння у ґрунти, ґрунтові води та атмосферне повітря. Особливу увагу приділено процесам утворення діоксинів і фуранів під час пожеж на промислових та цивільних об'єктах, де присутні хлоровмісні сполуки або матеріали на основі полівінілхлориду (ПВХ).

Означені основні механізми утворення токсичних речовин під час термічної деструкції органічних матеріалів, зокрема при піролізі ПХД та хлорованих ароматичних речовин. З'ясовано, що значна частина діоксинів переноситься разом із частинками сажі та осідає в безпосередній близькості до осередків горіння, формуючи локальні зони високого забруднення. Окремо розглянуті ризики, пов'язані з підтопленням складів пестицидів, що сприяє активній міграції СОЗ у водні екосистеми.

На основі аналізу даних запропоновані підходи щодо вдосконалення методології ідентифікації та інвентаризації забруднених територій, зазначена необхідність відбору проб не лише ґрунту та води, але й сажі та пилу. Обґрунтовано доцільність використання транспортбельних технологічних комплексів для оперативної ліквідації наслідків забруднення, що поєднують механіко-хімічну обробку, термодесорбцію та термодеструкцію.

У довгостроковій перспективі запропоновано впровадження комплексних стратегій відновлення територій із застосуванням біодеградації, фіторе mediaції та інших екологічно безпечних методів. Отримані результати можуть використовуватися для оновлення Національного плану дій з виконання Стокгольмської конвенції та розробці ефективних заходів з мінімізації екологічних ризиків, спричинених військовими діями. *Ключові слова:* стійкі органічні забруднювачі, ПХД, діоксини, військові дії, пожежі, забруднення довкілля, ремедіація.

Environmental Pollution by Persistent Organic Pollutants as a Result of Military Activities. Bondar O., Chetverykov V., Ryzhenko N., Liubimov A.

This study investigates the impact of military activities on the emergence of new sources and changes in emission volumes of persistent organic pollutants (POPs) in Ukraine. It is shown that the destruction of facilities for the storage and accumulation of POPs, including warehouses of obsolete pesticides and electrical equipment containing polychlorinated biphenyls (PCBs), leads to their uncontrolled release into soils, groundwater, and the atmosphere. Particular attention is paid to the formation of dioxins and furans during fires at industrial and civilian facilities where chlorine-containing compounds or polyvinyl chloride (PVC)-based materials are present. The main mechanisms of toxic compound formation during the thermal degradation of organic materials are analyzed, particularly in the processes of PCB pyrolysis and the decomposition of chlorinated aromatic compounds. It has been established that a significant portion of dioxins is transported with soot particles and deposited in close proximity to fire sources, forming localized zones of high contamination. Special consideration is given to the risks associated with the flooding of pesticide storage sites, which enhances the migration of POPs into aquatic ecosystems.

Based on the analysis of available data, approaches are proposed to improve methodologies for the identification and inventory of contaminated areas, including the need to collect not only soil and water samples but also soot and dust. The feasibility of using transportable technological systems for rapid remediation is substantiated; such systems combine mechanochemical treatment, thermal desorption, and thermal destruction processes.

In the long term, the implementation of comprehensive land restoration strategies is proposed, including biodegradation, phytoremediation, and other environmentally safe methods. The obtained results can be applied in updating the National Implementation Plan under the Stockholm Convention and in developing effective measures to minimize environmental risks caused by military activities. *Key words:* persistent organic pollutants, PCBs, dioxins, military activities, fires, environmental pollution, remediation.



Визначення масштабів проблеми.

В Україні досить загрозливим потенційним джерелом надходження СО₃ в ґрунт та ґрунтові води може стати електротехнічне обладнання, що містить поліхлоровані дифеніли. Так, згідно з інвентаризацією, проведеною під час розроблення першої редакції національного плану дій (НПД) з виконання Стокгольмської конвенції про СО₃ [1], на двох маріупольських металургійних комбінатах знаходилося (станом на 2022 рік) 250 трансформаторів, заповнених поліхлорованими дифенілами загальною вагою близько 600 т. Зважаючи на масштаби руйнування цих комбінатів значна частка таких ПХД потрапила на будівельні конструкції, ґрунт або разом з продуктами горіння мігрувала за межі об'єктів руйнування.

Небезпечними джерелами забруднення ґрунтів та ґрунтових вод стійкими органічними забруднювачами можуть стати місця накопичення відходів та некондиційних хімічних засобів захисту рослин, що містять СО₃. Зокрема, станом на початок повномасштабної російської військової агресії проти України, на складах з незадовільними умовами зберігання знаходилося близько 8 тисяч тонн непридатних до використання або заборонених засобів захисту рослин. Сприятливі умови для міграції СО₃-вмісних пестицидів склалися в Херсонській області. Внаслідок руйнування греблі Каховської ГЕС місця зберігання 1900 т пестицидів [2] опинилися в зоні підтоплення.

Потужне джерело емісії СО₃ у повітря може виникнути під час пожежі на підприємствах хімічної промисловості, де використовується хлор, який, взаємодіючи з продуктами горіння, призводить до синтезу діоксинів та фуранів. Навіть під час пожежі на об'єктах, що не використовувалися у виробництві, хлорвмісні реагенти, синтез діоксинів та фуранів може відбуватися завдяки наявності в будівельних конструкціях полівінілхлоридів (ПВХ). Джерелом хлору для синтезу діоксинів та фуранів також можуть стати компоненти палива твердопаливних ракет або продукти його згоряння.

Базові заходи до оновленого плану дій вже були сформовані напередодні повномасштабних військових дій в Україні [2]. Обґрунтування заходів спиралося на результати попередніх інвентаризацій, скорегованих з урахуванням даних, наведених у регіональних доповідях про стан навколишнього природного середовища та екологічних паспортах областей за останні передвоєнні роки. Остаточне визначення заходів НПД стане можливим тільки після проведення комплексної інвентаризації СО₃ у відповідності до вимог Стокгольмської конвенції заходами обстеження територій забруднених внаслідок військових дій. Але перед цим мають бути заповнені деякі методичні прогалини щодо оцінки емісії СО₃ під час пожеж на промислових об'єктах та визначення оптимальних технічних рішень із очищення ґрунтів з урахуванням специфіки забруднення в Україні.

Емісія СО₃ під час пожеж на промислових об'єктах.

Пожежі на промислових об'єктах відрізняються одна від одної за характером протікання термічних процесів, тому механізми утворення ПХДД/ПХДФ можна окреслити в досить узагальненому вигляді. Методичний посібник щодо виявлення та кількісної оцінки викидів діоксинів, фуранів та інших ненавмисно утворених СО₃ [1] розроблений на замовлення виконавчого органу Стокгольмської конвенції, не дає інформації щодо оцінки емісії СО₃ під час пожеж. Тому основою для експертних оцінок можуть бути дані отримані при вивченні наслідків реальних пожеж та лабораторні дослідження процесів деструкції та синтезу СО₃ від термічних умов.

Пожежі на об'єктах з електрообладнанням, що містить ПХД.

В Україні використовуються у великих обсягах конденсатори, просочені соволом (синтетичний діелектрик на базі пентахлордифенілу) та трансформатори, заповнені совтолом-10, що містить 10% трихлорбензолу та 90% соволу. Існує небагато інформації стосовно емісії СО₃ при пожежах на об'єктах з електрообладнанням заповненим ПХД. Це, ймовірно, пов'язано з тим, що ПХД є вогнестійкими оливами і тому створення умов для синтезу вторинних СО₃ можливе лише через їх піроліз та наступних хімічних перетворень продуктів піролізу. Забруднення навколишнього середовища ПХДФ та ПХДД майже повністю зумовлене рухом сажі, що утворилася під час пожежі.

Системний аналіз випадків пожеж на електротехнічному обладнанні з ПХД, наведений в праці [2] (таблиця 1). Пожежі на електрообладнанні характеризувалися викидом значної кількості маслянистої чорної сажі навіть при д незначному вогні. Як наслідок пожежі, що виникла на трансформаторах з поліхлорованими дифенілами та поліхлорованими бензолами (ПХБ), були зафіксовані як ПХДД, так і ПХДФ. На пожежах, що торкнулися конденсаторів, були означені тільки ПХДФ, ПХДД – відсутні. Окрім ПХДФ та ПХДД на деяких пожежах також були зафіксовані утворення хлорованих біфеніленів (ПХБп) та хлорованих піренів (ПХПі).

Можливість утворення тих чи інших СО₃ в процесі піролізу ПХД була перевірена в лабораторних дослідженнях [4]. Так, приміром, під час нагрівання ПХД (Aroclor 1248) у герметичній ємності було помічено, що ПХДФ утворюються за температури понад 270°C та досягають максимального рівня за близько 300°C. Основними компонентами продуктів піролізу були ди- та трихлордибензофурані. Отже, було зроблено висновок, що для перетворення необхідні температури вище 270°C, але за температури вище 330°C ПХДФ розкладаються. Варто зазначити, що в продуктах була підтверджена наявність 2,3,7,8-тетрахлордибензофурану на рівні близько 80 ppm.

Таблиця 1

Пожежі на електрообладнанні, наповненого ПХД

Місце	Причина	Умови	Аналіз проб	Коментарі
Торонто, Онтаріо підземне сховище	Несправність електричного обладнання	Розлилося приблизно 100 галонів аскорилю; частина випарувалася під дією вогню	приблизно 5 ppm ПХДФ	Зразки сажі містили приблизно 10000 ppm ПХД
Бінгемтон, Нью-Йорк офісна будівля	Несправність електричного обладнання	Руйнування трансформатора, розлилося приблизно 180 галонів аскорилю	2,3,7,8-ТХДФ – 12-270 ppm; загальні ПХДФ 765-2160 ppm; 2,3,7,8-TCDD 0,6-2,8 ppm; загальний вміст PCDD 20 ppm	Було також виявлено хлорований біфенілен (ПХБп) у кількості 54 ppm
Стокгольм, Швеція трансформаторна станція	Несправність електричного обладнання	В зоні пожежі опинилися 18 конденсаторів з ПХД; деякі вибухнули	Проби стирання: 2,3,7,8-ТХДФ 150 нг/м ² загальний вміст ПХДФ 1,4 г/м ² ПХДД не виявлено	Було також виявлено хлорований біфенілен (ПХБп) та хлоровані пірени (ПХПі) і
Сковде, Швеція конденсаторна батарея на заводі з обробки металу	Несправність електричного обладнання	В зоні пожежі опинилися 21 конденсатор; 12 конденсаторів з ПХД зруйновані вогнем	загальний вміст ПХДФ – 800 нг/м ² 2,3,7,8-TCDF – 100 нг/м ² ПХДД не виявлено	Виявлено хлоровані пірени ПХПі (ПХБп) не виявлено
Сурахаммар, Швеція сталеливарний завод	Вибух у сталеплавильній печі	Постраждало 500 конденсаторів: 200 з ПХД; 300 з мінеральними оливами	Проби стирання в залі конденсаторів показали рівень 4 нг/м ² . ТХДФ; ПХДД не виявлено	Також виявлені ПХПі

Під час піролізу поліхлорованих бензолів, що також можуть бути складовою трансформаторних олив, розкладання становило для трихлорбензолу > 95%, для тетрахлорбензолу приблизно 90% і для пентахлорбензолу приблизно 50% [4]. Окрім хлорбензолів, мас-спектральний аналіз піролізатів засвідчив наявність інших хлорованих сполук, у тому числі ПХДФ, хлорфеноли, а також, в деяких випадках, – поліхлоровані нафталіни (головним чином гепта- та октахлор), поліхлоровані стироли (гепта- та октахлор) та поліхлоровані дифеніли. Поліхлоровані дифенілові ефіри та поліхлоровані дифеніліни не спостерігалися.

Пожежі, що призводять до синтезу ПХДД/ПХДФ.

До утворення великих обсягів ПХДД/ПХДФ можуть призвести пожежі на тих об'єктах, де використовуються або зберігаються у значних обсягах полівінілхлориди (ПВХ). У методичному посібнику UNEP³ наводиться лише один приклад, коли в результаті пожежі було знищено 600 тон ПВХ-пластику та 100 тонн ПВХ-плівки. Внаслідок неповного згоряння відбувся викид ПХДД/ПХДФ. Сажка, що утворилася під час розкладання ПВХ-кабелів, вміщувала до 200 нг ПХДД/ПХДФ на один грам її ваги.

Пожежі в будинках.

Полівінілхлорид у великих обсягах застосовується при виготовленні віконних рам, елементів трубопроводів, підлогових покриттів, а також для ізоляції дроту, тому пожежі в житловому секторі можуть призводити до синтезу ПХДД/ПХДФ та діоксиноподібних ПХД². Дослідження механізмів їх утворення дозволило визначити два взаємодоповнюючі шляхи їх утворення: через попередників із структурами, подібними до структур діоксинів

(хлорфенол, хлорбензол, ПХД, ПАВ тощо) та через синтез *de novo*, починаючи з аморфного вуглецю та проходячи через каталітичне хлорування з подальшим окисленням. Дослідження впливу температури нагрівання ПВХ на утворення діоксинів [3]: температура 300°C виявилася занадто низькою для інтенсивного піролізу; при 600°C концентрації діоксинів були високими; а вище 900°C їх розкладання відбувалося швидше, ніж утворення.

Оцінка щорічного утворення діоксинів [6] у США в результаті горіння ПВХ під час пожеж у будинках, спираючись на статистику пожеж та результати лабораторних аналізів зразків сажі та золи, засвідчила утворення діоксинів в діапазоні 0,47–23 г TEQ на рік, що склало незначну частку від 20–50 кг TEQ річного осадження з повітря, визначеного Агентством з охорони навколишнього середовища США. Однак дослідження лише залишків сажі або золи не враховують легкі викиди діоксинів і можуть значно занижувати обсяги викидів від реальних пожеж [4].

Пожежі на звалищах та неконтрольоване горіння побутових відходів.

Особливості викидів тієї чи іншої пожежі визначаються численними факторами, таким як кількість та морфологія відходів, ступінь їх розкладання та інше. Тому узагальнення рівнів викидів для різних сміттєзвалищ не є доцільним. Деякі особливості емісії ПХДД/ПХДФ сміттєзвалищами були встановлені під час пожеж на двох сміттєзвалищах в Мексиці [7]. Методом вуглецевого балансу для відібраних проб було встановлено коефіцієнт викидів ПХДД/ПХДФ, що дорівнює 823 нг (TEQ)/кг, що щонайменше в п'ять разів вище, ніж у попередніх дослідженнях

спалювання побутових відходів у бочках, і приблизно в 2000 разів вище, ніж у димарях сучасних спалювальних установок побутових відходів. Такі коефіцієнти викидів, обумовлені тим, що для сміттєзвалищ характерне тліюче горіння, що дає більш високі коефіцієнти викидів ніж від полум'я.

Розповсюдження продуктів горіння під час пожеж.

Розміри зони високої концентрації продуктів горіння при пожежах залежать головним чином від погодних умов під час пожежі. Концентрація забруднювачів залежить від наявності опадів, температури повітря, швидкості вітру. Встановлено, що стійкі органічні забруднювачі можуть переноситися на великі відстані, але їх концентрації при цьому не обумовлюють великі екологічні ризики. Значна частина діоксинів при пожежах переноситься частинками сажі та пилу та осідають на ґрунт в безпосередній близькості від зони горіння.

В рамках вивчення потенціальних ризиків для здоров'я людини досліджувалися зміни в концентраціях ПХДД/ПХДФ у просторі та часі на прикладі пожежі у 24-поверховій будівлі у Великобританії [6]. Проби з 6 локацій на відстані до 1,2 км від будівлі разом із зразками напівспалених уламків були зібрані через один та шість місяців після пожежі. Крім того через 17 місяців були зібрані зразки пилу і конденсату з будівлі, що знаходилася на відстані 160 м від зони займання. Результати дослідження засвідчили, що основними джерелами забруднення токсикантами є частинки діаметром понад 100 мкм, що осіли на відстані до 200 м від зони займання. Зразки зібрані в межах 140 м від зони займання показали, що концентрація поліхлорованих дібензо-*p*-діоксин в ґрунті в 60 разів більше, ніж в іншій міській місцевості Великобританії.

Наведений аналіз існуючої інформації щодо забруднення повітря та ґрунтів стійкими органічними забруднювачами під час пожеж дозволяє означити пріоритетні заходи до НПД з ідентифікації та інвентаризації місць забруднення СОЗ, зокрема, й збір інформації щодо стану електротехнічного обладнання заповненого ПХД. Також, спираючись на результати попередніх інвентаризацій, необхідно зібрати інформацію щодо місць накопичення заборонених до використання пестицидів, що могли опинитися в зоні підтоплення після руйнування Каховської ГЕС. На базі отриманої інформації має бути розроблений план обстежень потенційно забруднених ділянок. Обстеження забруднених ділянок має здійснюватися у відповідності до Методичних рекомендацій щодо визначення територій, що містять стійкі органічні забруднювачі [5]. Необхідно взяти не тільки проби ґрунту та ґрунтових вод на прилеглих ділянках але й сажі, що осіла на стіни будівель, що знаходяться поруч із зоною горіння. Дані результатів обстежень вносяться до інвентаризаційних реєстрів та використовуються для оцінки ризиків з подаль-

шим визначенням пріоритетів щодо здійснення заходів із відновлення забруднених ділянок.

Визначення найефективніших технічних рішень щодо відновлення забруднених ділянок.

Методологія визначення заходів щодо відновлення ґрунтів та ґрунтових забруднених стійкими органічними забруднювачами в Україні попередньо окреслена в роботі [6]. Розглянуті можливості застосування таких методів відновлення як фізико-хімічна деградація, біодеградація, термічна обробка, фіторе mediaція, ізоляція. Для кожного методу проаналізовані варіанти застосування *in-situ* (процес обробки здійснюється безпосередньо в ґрунті або ґрунтових водах) та *ex-situ* (процес обробки здійснюється після екскавації ґрунту або відкачування води). Зважаючи на поточний обсяг та особливості локації забруднень, означені у минулі роки, найбільш прийнятним для України варіантом розв'язання проблеми є використання *ex-situ* транспортбельних установок для термічного знешкодження забруднювачі [11]. Високу ефективність використання транспортбельної установки має забезпечити сполучення модулів непрямої термічної десорбції та термодеструкції в розплавах сполук лужних металів.

Внаслідок масштабних пожеж під час бойових дій до проблеми забруднення ґрунтів та ґрунтових вод додалась проблема великої кількості відходів руйнування будівель, забруднених синтезованими діоксинами. У настановах з найкращих наявних методів та передових екологічних практик управління територіями, забрудненими стійкими органічними забруднювачами [7] згадується лише один випадок застосування установок непрямої термічної десорбції для видалення СОЗ з будівельних відходів в Чеській Республіці. Але застосування такої технології має обмеження щодо габаритів відходів і не може бути застосовано для очищення стін будівель. У цьому випадку можливо доцільно застосувати досвід очищення приміщень, в яких виконувались операції з СОЗ-вмісними пестицидами або обладнанням, заповненим ПХД. Згідно з стандартами та процедурами, затвердженими агентством охорони навколишнього середовища США, для знезараження обладнання забрудненого ПХД можуть бути застосовані органічні знезаражуючі рідини, зокрема: гас, дизельне паливо, терпенові вуглеводні тощо. Відомо, що гас також ефективно видаляє сажу, що адсорбувала діоксини. Відпрацьована рідина термічно знешкоджується, що забезпечить руйнування адсорбованих СОЗ.

Технічні пропозиції щодо відновлення забруднених ділянок.

Запропонована раніше базова конфігурація обладнання у складі транспортбельного технологічного комплексу [13] для очищення ґрунтів з певним вдосконаленням може застосовуватися для усунення наслідків військових дій. Блок-схема вдосконаленої установки наведена на рисунку 1.

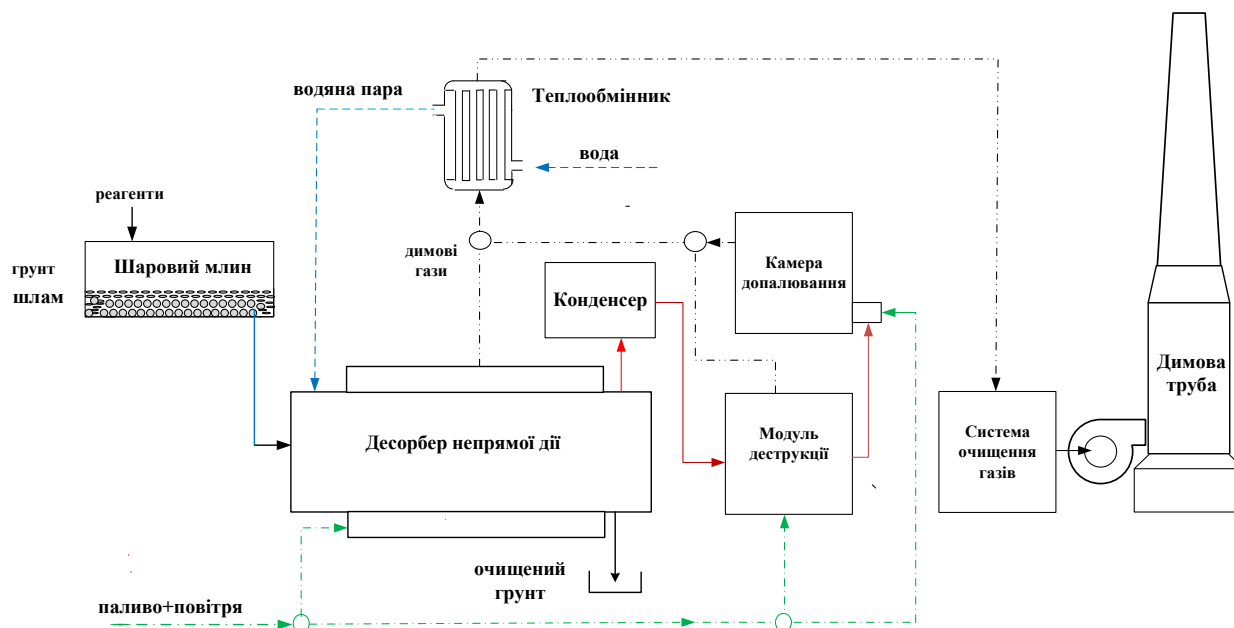


Рис. 1. Технологічна схема термічної обробки ґрунтів, забруднених CO_2

На значних площах ґрунтів з високими концентраціями ПХД, що утворилися наслідок руйнування трансформаторів, або з високими концентраціями ДДТ (в результаті підтоплення складів), забезпечити загальну ефективність очищення здатний модуль механіко-хімічного дегалегування [6]. Випробування технології Radicalplanet підтвердили ефективність деструкції висококонцентрованих CO_2 вище 99%.

Внаслідок змивання сажі з будівельних конструкцій можуть утворитися великі обсяги розчинників, забруднених сажею з адсорбованими на ній CO_2 . Шлам, що утворився, може бути змішаним з забрудненим ґрунтом та пройти всі етапи механіко-хімічної та термічної обробки.

Для термічного знешкодження забруднених будівельних відходів, подрібнених до відносно невеликих розмірів, може застосовуватися технологічний комплекс на базі обертової печі [2]. В рамках виконання проекту ГЕФ/ЮНІДО «Екологічно обґрунтоване управління та остаточне видалення поліхлорованих дифенілів (ПХД) в Україні» обґрунтовано використання технологічного комплексу на основі обертової печі для термічного знешкодження твердих та рідких відходів з вмістом хлору до 2%. Використання комплексу планувалося для термічного знешкодження попередньо подрібнених корпусів ПХД-вмісних конденсаторів. Для ефективного використання такого комплексу для очищення ґрунтів, забруднених CO_2 , необхідно зробити деякі зміни в конфігурацію обладнання та здійснення окремих технологічних операцій. Технологічний комплекс спроектований для спалювання відходів із серед-

ньою теплотворною здатністю 3500 ккал/кг. Для досягнення такої величини раціональним рішенням є додавання забруднених ґрунтів з місць руйнування ємкостей для зберігання нафтопродуктів. З метою убезпечення утворення діоксинів/фуранів комплекс доцільно доповнити модулем механіко-хімічної обробки ґрунтів.

Запропоновані технічні рішення дозволяють забезпечити в короткостроковій перспективі усунення найбільших екологічних ризиків від емісії CO_2 . Під час розроблення оновленого Національного плану дій мають враховуватися також середньострокові та довгострокові заходи з остаточного відновлення забруднених ділянок з використанням таких методів, як біодеградація, фіторе mediaція та інші.

Висновки.

Значна кількість електротехнічного обладнання, що містить ПХД, опинялася в зоні обстрілів. Отже, є висока вірогідність забруднення ґрунту внаслідок руйнування обладнання та витоку олив. Інший шлях забруднення довкілля – перенесення із сажею продуктів піролізу ПХД.

Потенційними джерелами масштабного забруднення ґрунтів та ґрунтових вод CO_2 також можуть стати об'єкти накопичення CO_2 -вмісних пестицидів, що опинилися в зоні підтоплення внаслідок руйнування гідротехнічних споруд.

З метою усунення в короткостроковій перспективі екологічних ризиків, викликаних емісією CO_2 , доцільно використовувати транспортабельні технологічні комплекси з модулями механіко-хімічного оброблення, термодесорбції та термодеструкції забруднювачів.

Література

1. National Implementation Plan for the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants URL: <http://www.pops.int/Implementation/NationalImplementationPlans/NIPTransmission/tabid/253/Ukraine> (дата звернення: 23.03.2026).
2. Chetverykov V. V., Holoubek I., Panykh K. K. The current state of the issue of persistent organic pollutants in Ukraine and approaches for its resolution. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2021. № 2. С. 80–86. DOI: 10.33070/etars.2.2021.07.
3. Toolkit for Identification and Quantification of Releases of Dioxins, Furans and Other Unintentional POPs. – UNEP, 2013. URL: <https://chm.pops.int/Implementation/UnintentionalPOPs/ToolkitforUPOPs/Overview/tabid/372/Default.aspx> (дата звернення: 23.03.2026).
4. Hutzinger O., Choudhry G. G., Chittim B. G., Johnston L. E. Formation of polychlorinated dibenzofurans and dioxins during combustion, electrical equipment fires and PCB incineration. Environmental Health Perspectives. 1985. Vol. 60. P. 3–9.
5. Zhang M., Buekens A., Jiang X., Li X. D. Dioxins and polyvinyl chloride in combustion and fires Waste Management & Research. 2015. Vol. 33(7). P. 630–643. DOI: 10.1177/0734242X15590651.
6. Kim K.-S., Hong K.-H., Ko Y.-H., Kim M.-G. Emission characteristics of PCDD/Fs, PCBs, chlorobenzenes, chlorophenols, and PAHs from polyvinyl chloride combustion at various temperatures. Journal of the Air & Waste Management Association. 2004. Vol. 54. P. 555–562. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470925.
7. Carroll W. F. PVC in house fires: the great unknown source of dioxin? Fire and Materials. – 1996. Vol. 20. P. 161–166. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1018(199607)20:4<161::AID-FAM563>3.0.CO;2-7.
8. Ruokojärvi P., Aatamila M., Ruuskanen J. Toxic chlorinated and polyaromatic hydrocarbons in simulated house fire Chemosphere. 2000. Vol. 41(6). P. 825–828. DOI: 10.1016/S0045-6535(99)00549-4.
9. Gullett B. K. et al. PCDD/F, PBDD/F, and PBDE emissions from open burning of a residential waste dump. Environmental Science & Technology. 2010. Vol. 44(1). P. 394–399. DOI: 10.1021/es902676w.
10. Stec A. A., Dickens K., Barnes J. L. J., Bedford C. Environmental contamination following the Grenfell Tower fire. Chemosphere. 2019. Vol. 226. P. 576–586. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.153.
11. Про затвердження Методичних рекомендацій щодо визначення територій, що містять стійкі органічні забруднювачі: наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 12.10.2021 № 668. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0668926-21#Text> (дата звернення: 23.03.2026).
12. Бондар О. І., Риженко Н. О., Четвериков В. В. Методичні засади очищення забруднених ділянок від стійких органічних забруднювачів. Екологічні науки. 2024. № 4(55). – С. 70–78. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.11>
13. Четвериков В. В. Термічна обробка ґрунтів ex-situ з метою видалення стійких органічних забруднювачів. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2025. № 1. – С. 118–124. DOI: 10.33070/etars.1.2025.
14. POPs contaminated sites guidance URL: <https://chm.pops.int/Implementation/BATandBEP/POPscontaminatedsites/Guidance/tabid/9649/Default.aspx> (дата звернення: 23.03.2026).
15. New POPs technology specification and data sheets: Radicalplanet technology (mechanochemical principle) URL: http://www.ihpa.info/docs/library/reports/Pops/June2009/DEFSBCFactSheetRadicalPlanet_070608_includedMTKJune2009.pdf (дата звернення: 23.03.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 10.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАНДАРТІВ І ПРОЦЕДУР ОЦІНКИ ВІДПОВІДНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПОТЕНЦІЙНО ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ПИЛОВИХ СЕРЕДОВИЩ В УКРАЇНІ ТА ЄС

Гетьман Б.А., Волошина Н.О.

Український державний університет імені Михайла Драгоманова
вул. Пирогова, 9, 02000, м. Київ

b.a.hetman@udu.edu.ua, n.o.voloshyna@udu.edu.ua

У статті досліджено питання гармонізації національних стандартів для цілей застосування технічного регламенту обладнання та захисних систем, призначених для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах та захисних систем і юридичний режим визнання результатів їхньої оцінки в Україні та ЄС. **Метою дослідження** є встановлення причин, з яких ідентичність або близькість ДСТУ, EN, IEC та ISO стандартів не забезпечує взаємного визнання сертифікатів і призводить до повторної сертифікації технічного обладнання при переміщенні продукції між ринками України та ЄС. **Методологія** ґрунтується на порівняльно-правовому, порівняльно-технічному та документальному аналізі ДСТУ EN 1127-1:2020, ДСТУ EN 60079-10-2:2022, ДСТУ EN ISO/IEC 80079-20-2:2019, Технічного регламенту № 1055, наказу Міністерства економіки № 2259, Директиви 2014/34/EU, Директиви 1999/92/EC, Blue Guide 2022, матеріалів Європейської Комісії, а також відкритих документів Notified Bodies. **Наукова новизна** полягає в систематизації розриву між технічною гармонізацією і юридичним невизнанням результатів оцінки відповідності та в обґрунтуванні екологічної значущості цієї проблеми для обладнання, що працює з горючим пилом. Доведено, що в умовах ЄС продукція, оцінена за Директивою 2014/34/EU здійснює вільний обіг всередині єдиного ринку без повторної національної АТЕХ-процедури, тоді як для ринку України діє окремий національний правовий контур. У результаті вже оцінене в ЄС обладнання має проходити локальну процедуру в Україні, а український виробник – окрему процедуру для виходу на ринок ЄС. **Практичне значення** роботи полягає у формуванні порівняльної матриці критеріїв, знеособлених кейсів і дорожньої карти рішень щодо часткового використання результатів випробувань та зближення процедур оцінки відповідності. **Ключові слова**: потенційно вибухонебезпечне середовище, горючий пил, АТЕХ, Технічний регламент № 1055, оцінка відповідності, взаємне визнання, Notified Body, пил, аспіраційні системи, екологічна безпека.

Comparative analysis of standards and procedures for conformity assessment of equipment for potentially explosive dust environments in Ukraine and EU. Hetman B., Voloshyna N.

The article examines the relationship between technical harmonisation of standards and the legal regime for recognising conformity assessment results for equipment intended for potentially explosive dust atmospheres in Ukraine and the EU. The aim is to identify why the identity or close alignment of DSTU, EN, IEC and ISO standards does not ensure mutual recognition of certificates and leads to repeated certification when products move between the Ukrainian and EU markets. The research methodology combines comparative legal, comparative technical and documentary analysis of DSTU EN 1127-1:2020, DSTU EN 60079-10-2:2022, DSTU EN ISO/IEC 80079-20-2:2019, Technical Regulation No. 1055, Order of the Ministry of Economy No. 2259, Directive 2014/34/EU, Directive 1999/92/EC, the Blue Guide 2022, European Commission guidance and public documents of notified bodies. The scientific novelty consists in systematising the gap between technical harmonisation and legal non-recognition of conformity assessment results, and in substantiating the ecological relevance of this gap for equipment working with combustible grain dust. It is shown that within the EU, products assessed under Directive 2014/34/EU move within the single market without repeated national ATEX procedures, whereas Ukraine applies a separate national regulatory regime. As a result, EU-assessed equipment must undergo a local procedure in Ukraine, while Ukrainian manufacturers need a separate EU procedure to access the EU market. The practical value of the article lies in the comparative matrix, anonymised cases and a roadmap of short-, medium- and long-term measures, including partial use of test results and gradual alignment of conformity assessment procedures. **Key words**: potentially explosive atmosphere, combustible dust, ATEX, Technical Regulation No. 1055, conformity assessment, mutual recognition, Notified Body, dust, aspiration systems, environmental safety.

Постановка проблеми. В умовах сьогодення питання запобігання виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури, в тому числі пов'язаних з продовольчою безпекою потребує особливої уваги та урахування європейських стандартів до обладнання для вибухонебезпечних середовищ. У сфері

обладнання для потенційно вибухонебезпечних середовищ Україна і ЄС використовують ідентичні технічні вимоги, приймаються IDT стандарти EN/IEC/ISO, застосовується логіка презумпції відповідності, використовуються подібні поняття вибухонебезпечної атмосфери, груп і категорій обладнання. Однак виробник або імпортер, який уже пройшов



процедуру оцінки відповідності в одній системі, не отримує автоматичного права виходу на інший ринок. Зіставлення українського ТР № 1055 [1] із Директивою 2014/34/EU [2] дає підстави стверджувати, що бар'єр формує не технічна різниця стандартів, а відмінність юрисдикційного режиму доступу продукції на ринок через взаємне не визнання результатів одних і тих самих процедур.

Актуальність дослідження. Для пилових середовищ ця проблема має додатковий екологічний вимір. Директива 2014/34/EU та ТР 1055 прямо поширюються на обладнання і захисні системи для середовищ, небезпека вибуху в яких створюється пилом, а АТЕХ 1999/92/ЕС [3] та НПАОП 0.00-7.23-23 [4]. Вимагаються, зокрема, оцінювати ризики вибуху, класифікувати зони та безпечно відводити або видаляти горючий пил, якщо його викид може створити небезпеку вибуху. Це дозволяє зробити висновок, що затримка з уведенням у дію безпечного обладнання для аспірації, транспортування, фільтрації та обробки сировини рослинного і мінерального походження, наприклад зернових, має значення не лише для охорони праці, а й для запобігання аварійним викидам твердих забруднюючих речовин і продуктів горіння.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження мають міждисциплінарний характер, об'єднуючи проблеми екологічної безпеки, технічного регулювання, євроінтеграції та модернізації промислової інфраструктури. Безпосередньо пов'язано з практичними потребами підприємств, які експлуатують фільтри, вентилятори, роторні клапани, транспортне та обладнання для обробки горючих матеріалів (зерно, деревина, вугілля і т.п.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В офіційних джерелах домінують дві групи матеріалів: по-перше, нормативно-технічні документи, що описують методику вибухозахисту, зонування та випробування пилу; по-друге, правові й роз'яснювальні джерела щодо введення продукції на ринок, ролі Notified Bodies, CE-маркування, ринкового нагляду та гармонізованих стандартів. Blue Guide [5] систематизує загальні правила для гармонізованих секторів, а сторінки Physikalisch-Technische Bundesanstalt [6] та DEKRA [7] показують, як Notified Bodies фактично працюють з АТЕХ-оцінкою, включно з електричним і неелектричним обладнанням для пилових категорій 1D, 2D і 3D. Водночас, виявляється дефіцит стислого україномовного аналізу саме розриву між гармонізацією стандартів і невизнанням результатів оцінки відповідності.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо систематизованими залишаються три питання: по-перше, чому тотожність стандартів не перетворюється на взаємне визнання сертифікатів?; по-друге, як розмежувати product safety і workplace safety так, щоб не перетиналися вимоги до ринку продукції з вимогами до

роботодавця?; по-третє, яким чином повторна сертифікація впливає на строки впровадження безпечного обладнання для горючого пилу, а отже – і на екологічну безпеку виробництва?

Новизна. Наукова новизна статті полягає в тому, що в ній:

1) систематизовано розрив між технічною гармонізацією та юридичним невизнанням результатів оцінки відповідності між Україною та ЄС;

2) запропоновано матрицю порівняння не лише стандартів, а й правового режиму доступу продукції на ринок;

3) обґрунтовано екологічне значення прискореного доступу до безпечного вибухозахищеного обладнання для аграрного сектору.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження виконано на основі порівняльно-правового, порівняльно-технічного й документального аналізу. Порівнювалися: правова база, предмет регулювання, статус органів, логіка використання стандартів, підходи до підтвердження відповідності, ринковий нагляд і наслідки для доступу продукції на ринок. Для практичної частини використано знеособлені кейси імпорту з ЄС в Україну та експорту з України до ЄС.

Викладення основного матеріалу. Директива 2014/34/EU встановлює уніфіковані правила для введення на ринок і введення в експлуатацію обладнання та захисних систем для потенційно вибухонебезпечних середовищ у межах ЄС. Вона визначає обладнання, захисні системи, компоненти, вибухонебезпечну атмосферу як суміш горючих речовин у формі газів, парів, туманів або пилу з повітрям, а також групи й категорії захисту обладнання. Сторінки Європейської Комісії щодо АТЕХ і harmonised standards додатково показують, що ця сфера інтегрована в New Legislative Framework, а посилання на гармонізовані стандарти публікуються в Official Journal of the European Union.

Український ТР № 1055 формує окремий національний режим для обладнання та захисних систем, призначених для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах. Для цілей цього регламенту Міністерство економіки України затверджує та оновлює перелік Національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності вимогам технічного регламенту. Архів і чинні оновлення за 2025–2026 роки свідчать, що українська система підтримує актуальність такого переліку, тобто технічне зближення з ЄС не є декларативним, а підтримується адміністративно.

Для пилового фокусу вирішальними є три стандарти. ДСТУ EN 1127-1:2020 [8] описує базову методологію, включно з risk assessment та identification of explosion hazards. ДСТУ EN 60079-10-2:2022 [9] деталізує area classification procedure for explosive dust atmospheres, джерела викиду, зони, пилові шари та документування цих

зон. ДСТУ EN ISO/IEC 80079-20-2:2019 [10] задає методи випробування горючого пилу, зокрема, модифіковану трубку Хартманна, сферичну посудину об'ємом 20 л, процедури визначення мінімальної температури займання хмари й шару пилу, а також мінімальної енергії займання. Отже, на технічному рівні український та європейський контури вже гармонізовані.

Відповідно, до workplace-ATEX 1999/92/EC роботодавець повинен оцінити ризики вибуху, класифікувати місця на зони, підготувати explosion protection document, забезпечити навчання, письмові інструкції та, коли це потрібно, систему допусків до робіт. Наказ № 2259 виконує ідентичну функцію в українському праві, але вони стосуються насамперед без-

пеки працівників під час експлуатації, а не правового доступу обладнання на ринок як такого. Саме тому в цій статті product safety є основним предметом порівняння, а workplace safety – необхідним контекстом, який пояснює, чому належно оцінене обладнання взагалі є обов'язковим для експлуатанта.

Найважливіше практичне розмежування проходить між нотифікованим органом у ЄС та органом оцінки відповідності в українському національному режимі. За роз'ясненнями Європейської Комісії, notified body – це організація, яку держава-член призначає для виконання визначених законодавством процедур оцінки відповідності; виробник вільний обрати будь-який legally designated notified body, а списки таких органів ведуться в NANDO [11].

Таблиця 1

Порівняльна матриця критеріїв доступу обладнання на ринок

Критерій	ЄС	Україна	Аналітичний висновок
Правова база	Директива 2014/34/EU	ТР № 1055	Різна юрисдикція дії, ідентичні вимоги
Предмет регулювання	Обладнання та захисні системи, призначені для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах – на ринку ЄС	Обладнання та захисні системи, призначені для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах – на ринку України	Ідентичні технічні вимоги, різні юрисдикції
Термінологія	Explosive atmosphere, group, category, notified body, Ex marking, CE marking	Вибухонебезпечне середовище, група, категорія, орган з оцінки відповідності, Ex маркування, знак відповідності ТР	Технічні поняття ідентичні, різні знаки відповідності які взаємно не визнаються
Класифікація зон	Директива 1999/92/EC, EN 60079-10-2:2015	НПАОП 0.00-7.23-23, ДСТУ EN 60079-10-2:2022 (EN 60079-10-2:2015, IDT)	Методика зонування ідентична, стандарти ідентичні
Категорії та групи обладнання	Групи I, II. Категорії 1, 2, 3	Групи I, II. Категорії 1, 2, 3.	Ідентичні
Модулі / процедури оцінки відповідності	Залежно від категорії продукції, із залученням notified body там, де це передбачено	Залежно від категорії продукції, із залученням органу оцінки відповідності там, де це передбачено	Модулі та процедури ідентична. Органи оцінки в різних юрисдикціях, результати оцінки взаємно не визнаються
Органи оцінки відповідності	Notified body в системі ЄС	Національний орган оцінки відповідності в українському правовому режимі	Виконують ідентичні процедури але взаємно не визнають результати
Маркування і відповідність	CE + Ex + пакет документації	CE + Ex + пакет документації	В Україні ще не дозволено наносити знак CE на продукцію, хоча стандарти гармонізовані і ідентичні.
Технічний файл / документація	Technical documentation, EU DoC, документи від notified body	Технічна документація, DoC, документи від органу оцінки відповідності	Ідентичний пакет документації але від органів з різної юрисдикції
Визнання результатів	Визнаються у межах внутрішнього ринку ЄС, не залежно від країни проходження процедури оцінки відповідності але не визнаються в Україні	Визнаються в Україні але не визнаються в ЄС	При гармонізованих вимогах та процедурах, результати оцінки взаємно не визнаються
Вартість / час	Повторна процедура для другої держави-члена ЄС не потрібна. Потрібна повторна оцінка для України.	Для виходу на український ринок або на ринок ЄС іншою стороною виникає повторний цикл	Строки сертифікації й прямі витрати зростають в 2 рази

У свою чергу, Blue Guide підкреслює, що акредитація є останнім рівнем публічного контролю в європейській системі оцінки відповідності. Тому, в ЄС працює не логіка «сертифікат конкретної держави», а логіка «сертифікат у межах єдиного гармонізованого правового простору».

Для бізнесу це означає, що вираз «європейський сертифікат» є лише спрощенням. У юридичному сенсі йдеться не про один абстрактний документ, а про пакет засобів підтвердження відповідності: залежно від категорії продукції – EU-type examination certificate, документи щодо виробництва й нагляду, EU declaration of conformity, технічну документацію, а також маркування. Європейська Комісія окремо застерігає, що так звані «voluntary certificates» не слід плутати з належною third-party conformity assessment, оскільки лише notified bodies мають право видавати сертифікати відповідності в межах гармонізованого законодавства і тільки в обсязі своєї нотифікації.

Отже, якщо продукція вже оцінена в системі 2014/34/EU, вона може вводитись у обіг в ЄС без повторної національної АТЕХ-процедури для іншої держави-члена; якщо ж та сама продукція виходить на український ринок – вона потрапляє в окремий національний режим ТР № 1055. І навпаки: продук-

ція, оцінена лише за українським технічним регламентом, не набуває автоматичного права на введення на ринок ЄС. Таким чином, взаємне невизнання процедур не заперечує технічної гармонізації, а співіснує з нею. Це є аналітичним висновком зі зіставлення джерел представлених в таблицях 1 і 2.

Для пилових категорій обладнання показовими є відкриті документи notified bodies. Матеріали Physikalisch-Technische Bundesanstalt демонструють, що цей орган є notified body № 0102 за Директивою 2014/34/EU та працює з електричним і неелектричним обладнанням і захисними системами групи II, зокрема категоріями 1D, 2D та 3D. Комісійні guidelines, оприлюднені через партнера-репозиторій, також прямо вказують на відповідність category 1 – zone 20, category 2 – zone 21 і category 3 – zone 22. Для українського контексту це практично означає прямий зв'язок між властивостями пилу, зонуванням і вибором фільтрів, вентиляторів, роторних клапанів, конвеєрів, шнеків та інших вузлів промислових технологій (таблиця 3).

У підсумку повторна сертифікація вже оціненого обладнання створює не лише дублювання документів, а й дублювання випробувань, у тому числі руйнівних.

Таблиця 2

Ідентичність технічних вимог та юридичних наслідків

Рівень порівняння	Уже гармонізовано	Не гармонізовано / не визнано
Стандарти	ДСТУ приймають EN/IEC/ISO як IDT або методом перекладу	Факт IDT не створює взаємного прийняття сертифіката
Методика безпеки	Оцінка ризику, випробування горючого пилу, зонування, вибір категорії обладнання	Юридичний ефект результатів цих процедур у різних юрисдикціях
Інституції	Високі вимоги до компетентності органів через акредитацію та секторальні правила	Статус notified body у ЄС не переноситься автоматично на український режим і навпаки
Доступ до ринку	Внутрішній ринок ЄС працює як єдиний простір для гармонізованої продукції	Україна та ЄС залишаються двома окремими правовими контурами доступу

Таблиця 3

Знеособлені практичні кейси повторної оцінки відповідності

Кейс	Маршрут	Додатковий час	Додаткова вартість	Основні документи	Результат
Кейс А	Оцінка в ЄС для подальшого використання в іншій державі-члені ЄС	0 міс.	0 грн*	EU-type examination / EU DoC / технічна документація / CE	Повторна національна АТЕХ-процедура для другої держави-члена не потрібна
Кейс В	Імпорт обладнання з ЄС в Україну	3 міс.**	Від 150 000 грн**	Європейський пакет документів + українська процедура за ТР № 1055	Вихід на ринок України після повторного циклу
Кейс С	Експорт обладнання з України до ЄС	3 міс.**	Від 450 000 грн**	Український пакет документів + окрема процедура в системі ЄС	Вихід на ринок ЄС після повторного циклу

*Для сценарію «друга держава-член ЄС» йдеться саме про відсутність повторної національної процедури після належного введення продукції на ринок ЄС, а не про нульову собівартість первинної оцінки відповідності.

**Індикативні значення додаткової вартості та часу зазначені орієнтовно для процедури оцінки відповідності обладнання Категорії 2D. Не враховано непрямі витрати, простої, логістику та можливі руйнівні випробування.

Висновки. По-перше, технічна гармонізація стандартів у сфері пилових вибухонебезпечних середовищ між Україною та ЄС є значною: використовується спільна логіка ризик-орієнтованого підходу, випробування пилу, класифікації зон і вибору категорії обладнання. По-друге, взаємного автоматичного визнання результатів оцінки відповідності між Україною та ЄС немає: у ЄС діє внутрішній ринок гармонізованої продукції, тоді як Україна застосовує окремий національний режим допуску на ринок. По-третє, для вибухозахисного обладнання повторна сертифікація має екологічно значущі наслідки, оскільки затримує введення захищених технічних рішень, здатних попереджати пилові вибухи, пов'язані з ними аварійні викиди та необхідність повторних випробувань з реальними вибухами. По-четверте, формальна гармонізація без

процедурного зближення не усуває технічні бар'єри в торгівлі та не забезпечує оперативного впровадження безпечного вибухозахисного обладнання.

Перспективи використання результатів дослідження. Практичне застосування результатів можливе в трьох часових горизонтах. Короткостроково – доцільно розробити процедури використання європейських протоколів випробувань і частин технічного файлу без повного дублювання вже виконаних робіт. Середньостроково – зближувати правила акредитації, призначення, нотифікації та взаємодії органів, а також визначити формальні критерії прийнятності іноземних результатів оцінки відповідності в українській процедурі. Довгостроково – рухатися до секторальних механізмів часткового або ширшого взаємного визнання для обладнання з високою безпековою та екологічною значущістю.

Література

1. Постанова Кабінету Міністрів України № 1055 від 28.12.2016 «Про затвердження Технічного регламенту обладнання та захисних систем, призначених для використання в потенційно вибухонебезпечних середовищах» (ТР № 1055). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1055-2016-p#Text> (дата звернення: 15.06.2026).
2. Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (recast). *Official Journal of the European Union*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/34/oj/eng> (дата звернення: 15.06.2026).
3. Directive 1999/92/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 1999 on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres. *Official Journal of the European Communities*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/92/oj/eng> (дата звернення: 16.06.2026).
4. МІНІСТЕРСТВО ЕКОНОМІКИ УКРАЇНИ. Наказ «Про затвердження Мінімальних вимог щодо безпеки та здоров'я працівників, які потенційно зазнають ризику у вибухонебезпечних середовищах» від 09.04.2023 № 2259. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0967-23#Text> (дата звернення: 17.06.2026).
5. Угода про асоціацію між Україною та ЄС: соціально-трудова вимір. Книга перша: збірник актів законодавства України та *acquis communautaire* / упоряд. З. Я. Козак. Львів: Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля», 2015.
6. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Explosion protection as notified body under Directive 2014/34/EU; ATEX 2014/34/EU Guidelines, 5th edition. URL: <https://www.ptb.de/cms/en/metrological-services/kbs/kbs1/explosion-protection.html> (дата звернення: 17.06.2026).
7. DEKRA. Explosion Protection Services; ATEX and IECEx certification for electrical and mechanical equipment. URL: <https://www.dekra.com/en/explosion-protection-services/> (дата звернення: 15.06.2026).
8. ДСТУ EN 1127-1:2020 Вибухонебезпечне середовище. Запобігання вибухам та захист від вибухів. Частина 1. Основні концепції та методологія (EN 1127-1:2019, IDT). [Чинний від 01.04.2021]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 86 с.
9. ДСТУ EN 60079-10-2:2022 Вибухонебезпечні атмосфери. Частина 10-2. Класифікація зон. Вибухонебезпечні пилові середовища (EN 60079-10-2:2015, IDT; IEC 60079-10-2:2015, IDT). [Чинний від 01.07.2020]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 54 с.
10. ДСТУ EN ISO/IEC 80079-20-2:2019 Вибухонебезпечні середовища. Частина 20-2. Характеристики речовин. Методи випробування горючого пилу (EN ISO/IEC 80079-20-2:2016; AC:2017, IDT; ISO/IEC 80079-20-2:2016; Cor 1:2017, IDT). [Чинний від 01.07.2020]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 64 с.
11. European Commission. Notified bodies and conformity assessment in the single market for goods; NANDO information system. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/goods/building-blocks/notified-bodies_en?prefLang=lv (17.06.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 25.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЕКОЛОГІЧНА ДИСФУНКЦІЯ ЦИФРОВОЇ ЕКОСИСТЕМИ В УМОВАХ РОЗВИТКУ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ: ЕКОСИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ

Муха Р.Б., Гнєзділова В.І.

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Галицька, 201Б, 76018, м. Івано-Франківськ
roman.mukha@pnu.edu.ua, viktoria.gniedzilova@pnu.edu.ua

У науковій статті проведено міждисциплінарний аналіз сучасної цифрової інфраструктури, яка інтерпретується авторами як принципово нове, соціо-техно-біологічне життєве середовище людства. У роботі обґрунтовано, що ця цифрова екосистема функціонує за фундаментальними законами та закономірностями, що є цілком аналогічними до процесів у природних екосистемах. Досліджено гостру системну кризу та дестабілізацію цифрового простору, які викликані стрімким розвитком технологій генеративного штучного інтелекту (ШІ) та неконтрольованим, лавиноподібним зростанням обсягів інформаційних потоків.

Автори пропонують відійти від традиційного психологічного чи соціологічного трактування проблеми інформаційного перевантаження. Замість аналізу суб'єктивного стресу окремих індивідів, у статті застосовано екосистемний підхід. За такого підходу масове когнітивне виснаження людей, організацій та суспільних інститутів розглядається не як ізольоване відхилення, а як ключовий екологічний індикатор порушення загального гомеостазу (рівноваги) та стійкості усієї цифрової системи.

Центральним теоретичним внеском дослідження є розробка та введення в науковий обіг концепції «інформаційної евтрофікації», сформульованої за прямою аналогією з екологічним процесом евтрофікації природних водоемів.

У статті вивчено конкретні екологічні механізми деградації інформаційного простору. Серед них виділено: прогресуюче зниження співвідношення сигнал/шум; глибоке порушення природних контурів саморегуляції системи; втрату інформаційного біорізноманіття через роботу рекомендаційних алгоритмів персоналізації, які замикають користувачів у монокультурних «інформаційних бульбашках».

На основі отриманих результатів, спираючись на концепцію планетарних меж, обґрунтовано концептуальну рамку системного екологічного регулювання цифрового простору. Авторами розроблено комплексну тривірневу стратегію відновлення стійкості, що охоплює індивідуальний (розвиток когнітивної екологічної культури та повільного читання), організаційний (управління інформаційними квотами, захист зон для аналітичної праці) та державний рівні. *Ключові слова:* цифрова екосистема, інформаційна евтрофікація, екологічна дисфункція, інформаційний гомеостаз, штучний інтелект, інформаційне перевантаження, екологія цифрового середовища.

Ecological dysfunction of the digital ecosystem under the development of artificial intelligence: an ecosystem approach to the analysis of information overload. Mukha R., Gniedzilova V.

The article provides a comprehensive interdisciplinary analysis of modern digital infrastructure, interpreted as a fundamentally new, socio-techno-biological living environment of humanity. It is substantiated in this work that this digital ecosystem functions according to fundamental laws and patterns entirely analogous to processes in natural ecosystems. The article examines the acute systemic crisis and destabilization of the digital space caused by the rapid development of generative artificial intelligence (AI) technologies and the uncontrolled, avalanche-like growth of information flows.

The article proposes a departure from traditional psychological or sociological interpretations of the information overload problem. Instead of analyzing the subjective stress of individuals, an ecosystem approach is applied. Within this framework, the mass cognitive exhaustion of individuals, organizations, and social institutions is viewed not as an isolated anomaly, but as a key ecological indicator of a disruption in the overall homeostasis (equilibrium) and resilience of the entire digital system.

The central theoretical contribution of the research is the development and introduction of the concept of «information eutrophication» formulated by direct analogy with the ecological process of eutrophication in natural bodies of water.

The article examines specific ecological mechanisms of digital space degradation. Among them, a progressive decrease in the signal-to-noise ratio; a profound disruption of the system's natural self-regulation loops; and a loss of informational biodiversity due to the operation of personalized recommendation algorithms that confine users within monocultural «information bubbles».

Based on the findings, and drawing upon the planetary boundaries framework, the conceptual framework for the systemic ecological regulation of the digital space is substantiated. A comprehensive three-tiered resilience restoration strategy has been developed, spanning the individual level (development of cognitive ecological culture and slow reading), the organizational level (management of information quotas, protection of zones for analytical work), and the state level. *Key words:* digital ecosystem, informational eutrophication, ecological dysfunction, informational homeostasis, artificial intelligence, information overload, digital environment ecology.



Постановка проблеми

Сучасна цифрова інфраструктура формує якісно нове середовище існування людини – *цифрову екосистему*, у якій відбувається безперервний обмін інформаційними потоками між мільярдами агентів: людьми, алгоритмами, платформами та системами штучного інтелекту (ШІ). Подібно до природних екосистем, ця система потребує рівноваги між виробництвом і споживанням ресурсів, підтримання різноманіття елементів і механізмів саморегуляції. Однак стрімкий розвиток генеративного ШІ порушує цю рівновагу, генеруючи безпрецедентні обсяги синтетичного контенту і провокуючи системну екологічну дисфункцію цифрової екосистеми.

Традиційний аналіз цієї проблеми здійснювався переважно у термінах когнітивної психології та соціології: дослідники описували суб'єктивне перевантаження індивідів, їхній технологічний стрес, атрофію мислення [10, 4, 12]. Попри безсумнівну цінність таких підходів, вони залишають поза увагою системний вимір явища: цифрова екосистема деградує незалежно від того, чи відчуває конкретний індивід перевантаження. Руйнуються структурні умови для якісної інформаційної взаємодії – так само, як евтрофікація озера руйнує умови для існування риби ще до того, як це стає помітно окремому спостерігачеві.

Справжня новизна ситуації полягає саме в системному характері кризи. Генеративний ШІ виступає *екологічним інвазивним видом* у цифровому середовищі: він масово витісняє верифікований людський контент, монополізує канали уваги та порушує природні цикли інформаційного обміну. Це явище потребує концептуального апарату екології систем, а не лише психологічного чи соціологічного аналізу. Дана стаття пропонує саме такий – екосистемний підхід.

Актуальність теми

Актуальність екосистемного підходу зумовлена кількома взаємопов'язаними тенденціями. По-перше, темпи генерації синтетичного контенту за допомогою ШІ вже перевищили здатність людських інституцій верифікувати інформацію, що призводить до прогресуючої деградації інформаційного середовища [7]. По-друге, алгоритмічна персоналізація формує монокультурні інформаційні ніші, знищуючи інформаційне біорізноманіття – різноманітність перспектив, джерел і когнітивних практик, необхідних для здорового суспільного дискурсу [8]. По-третє, концентрація алгоритмічної влади у руках обмеженої кількості платформ порушує розподілений характер екосистеми та знижує її стійкість до зовнішніх збурень.

Класична теорія когнітивного навантаження Дж. Свеллера [10] описувала обмеження робочої пам'яті окремої людини. Сьогодні ці обмеження стають релевантними для цілих соціальних систем, що є принципово новою ситуацією. Теорія стійко-

сті екосистем розроблена К. Голлінгом [5], та концепція планетарних меж [9] пропонують аналітичні інструменти для опису порогових станів, після яких система втрачає здатність до відновлення. Ця стаття розширює зазначені концепції на цифрове середовище, обґрунтовуючи поняття *екологічних меж когнітивного навантаження* – порогових значень інформаційного потоку, перевищення яких призводить до незворотної деградації цифрової екосистеми.

У контексті України, де інформаційна екосистема зазнає одночасно гібридних загроз і стрімкої цифровізації, розуміння екологічних механізмів її деградації набуває безпосереднього практичного значення для національної стійкості.

Наукова новизна дослідження полягає у наступному:

- вперше запропоновано екологічну модель цифрової інформаційної системи як соціо-техно-біологічної екосистеми, що функціонує за закономірностями, аналогічними природним екосистемам;
- введено поняття інформаційної евтрофікації як центрального механізму деградації цифрової екосистеми в умовах масової генерації синтетичного контенту;
- обґрунтовано необхідність встановлення екологічних меж когнітивного навантаження як порогових значень стійкості цифрової екосистеми;
- запропоновано реінтерпретацію когнітивного перевантаження як індикатора екологічної дисфункції, а не як самостійного центрального явища;
- розроблено тривірневу стратегію відновлення стійкості цифрової екосистеми, що охоплює індивідуальний, організаційний і державний рівні.

Теоретичні основи: цифрова екосистема як аналітична категорія

Поняття цифрової екосистеми

Поняття *цифрової екосистеми* використовувалося раніше переважно в економічному або соціальному контекстах. У цій роботі ми надаємо йому екологічного змісту, визначаючи цифрову екосистему як *складну соціо-техно-біологічну систему, в якій людські агенти, алгоритмічні системи та інформаційні потоки перебувають у стосунках взаємозалежності, конкуренції за ресурси уваги та коеволюції*. Подібно до природних екосистем, вона характеризується: (а) потоками ресурсів (інформація як аналог енергії); (б) трофічними рівнями (виробники контенту, посередники-алгоритми, споживачі-користувачі); (в) механізмами саморегуляції; (г) межами стійкості, перевищення яких веде до колапсу.

Центральним ресурсом цифрової екосистеми є людська увага – кінцевий і невідновлюваний ресурс, за який конкурують усі елементи системи. Алгоритмічні платформи оптимізовані під максимальне захоплення цього ресурсу, що аналогічне хижацькій стратегії в природному середовищі. Коли хижаки домінують над системою, екосистема деградує.

Від когнітивного перевантаження до екологічної дисфункції

Когнітивне перевантаження індивідів є видимим симптомом, але не причиною системної кризи. Причина – порушення інформаційного гомеостазу: здатності цифрової екосистеми підтримувати баланс між виробництвом і споживанням інформаційних ресурсів, між різноманіттям і стабільністю, між новизною і перевіреністю.

С. Лахлу [7] описує суспільне когнітивне перевантаження як системну кризу трьох доменів: інформаційного, морального і системного. Ми пропонуємо реінтерпретувати ці домени в екологічних термінах: інформаційний домен відповідає *забрудненню інформаційного середовища*; моральний – *деградації нормативних екосистемних послуг*; системний – *колапсу механізмів саморегуляції*. Таке переформулювання дозволяє застосувати до аналізу цифрового середовища весь арсенал теорії стійкості екосистем.

Екологічна модель цифрової екосистеми: ключові категорії

Таблиця екологічних відповідників

Для операціоналізації екосистемного підходу пропонується наступна система відповідностей між класичними екологічними категоріями та елементами цифрового середовища (табл. 1).

Інформаційна евтрофікація як центральний процес деградації

Ключовим теоретичним внеском цієї роботи є введення поняття *інформаційної евтрофікації* (за аналогією з евтрофікацією водойм). В екології евтрофікація – це надмірне збагачення водойми поживними речовинами, що призводить до вибухового розростання водоростей, виснаження кисню та загибелі більшості організмів екосистеми [1]. У цифровому середовищі аналогічний процес відбувається внаслідок масового генерування низькоякісного або синтетичного контенту за допомогою ШІ.

Інформаційна евтрофікація характеризується такими стадіями: (1) різке зростання обсягів контенту (переважно низькоякісного або синтетичного); (2) «зацвітання» алгоритмічно оптимізованого контенту, що монополізує канали уваги; (3) витіснення

якісного верифікованого контенту на периферію системи; (4) виснаження когнітивних ресурсів користувачів, аналогічне виснаженню кисню; (5) деградація екосистемних послуг – здатності системи забезпечувати якісну інформаційну взаємодію.

Генеративний ШІ радикально прискорює цей процес. Якщо раніше обсяг виробленого контенту обмежувався людськими ресурсами (часом, увагою, знаннями), то тепер ці обмеження фактично зняті. Система отримує нескінченний потік згенерованого контенту («поживних речовин»), який вона не здатна переробити.

Втрата інформаційного біорізноманіття

В екології біорізноманіття є ключовим показником здоров'я екосистеми і основою її стійкості. У цифровому середовищі аналогом є *інформаційне біорізноманіття*: різноманітність джерел інформації (новинні сайти, наукові видання, незалежні блоги, усна традиція), кутів зору на одну й ту саму подію чи проблему, форматів її подачі (текст, аудіо, відео, інфографіка) та способів, якими люди цю інформацію опрацьовують – читають використовуючи критичне мислення, обговорюють, перевіряють першоджерела. Алгоритмічна персоналізація систематично знищує це різноманіття, формуючи монокультурні «інформаційні бульбашки» [8] – аналог монокультурного сільського господарства, яке максимально вразливе до зовнішніх збурень.

Домінування обмеженої кількості алгоритмічних платформ є аналогом домінування одного виду в екосистемі. Таке домінування порушує природні цикли інформаційного обміну, пригнічує традиційні способи обробки інформації людиною, такі як критичне мислення і перевірка першоджерел створює системну вразливість: якщо алгоритм помиляється або зазнає зовнішнього впливу (наприклад, в умовах інформаційної війни) – вся екосистема виявляється дестабілізованою.

Механізми екологічної дестабілізації цифрової екосистеми

1. Зниження співвідношення сигнал/шум

Найбільш фундаментальним механізмом деградації є прогресуюче зниження співвідношення між

Таблиця 1

Екологічні категорії та їх відповідники у цифровій екосистемі

Екологічна категорія	Відповідник у цифровій екосистемі
Забруднювачі	Фейки, спам, AI-синтетичний контент
Ресурси	Увага користувача, когнітивна ємність
Трофічні рівні	Користувачі → алгоритми → платформи
Інвазивні види	Генеративний AI-контент, боти
Евтрофікація	Перенасичення інформацією, зниження сигнал/шум
Екосистемні послуги	Якісна, верифікована інформація
Біорізноманіття	Різноманітність джерел і когнітивних практик
Домінуючий вид	Алгоритмічні рекомендаційні системи

сигналом (достовірною, релевантною інформацією) та шумом (нерелевантним, маніпулятивним або синтетичним контентом). Генеративний ШІ є основним «виробником шуму» в сучасній цифровій екосистемі, оскільки здатен генерувати правдоподібний, але семантично порожній або неточний контент у необмежених обсягах.

Зниження співвідношення сигнал/шум рівнозначне отруєнню природного середовища: організми витрачають дедалі більше ресурсів на фільтрацію шкідливих речовин і дедалі менше – на продуктивну взаємодію з середовищем. У системі, де більша частина контенту є «шумом», когнітивне виснаження стає неминучим наслідком навіть раціонального інформаційного споживання.

2. Порушення саморегуляції системи

Здорова екосистема має механізми зворотного зв'язку, що запобігають надмірному зростанню будь-якого окремого елемента. У здоровій цифровій екосистемі такими механізмами є: редакційні стандарти, репутаційні системи, фактчекінг, правові норми. Однак швидкість генерації контенту за допомогою ШІ систематично перевищує швидкість роботи цих регуляторних механізмів, що рівнозначне порушенню зворотних зв'язків у природній екосистемі.

Д. Аджемоглу [3] зазначає, що коли люди перекладають пошук та аналіз інформації на системи штучного інтелекту, в них зникає стимул самостійно вчитися, та накопичувати знання. У такий спосіб руйнується сам фундамент на якому створюється якісний науковий, творчий чи інший контент. В нашій інтерпретації – активна експлуатація ШІ контенту руйнує «виробничу базу» екосистемних послуг. Це аналогічно до ситуації, коли *хижацька надексплуатація ресурсів руйнує відтворювальну здатність системи*: у короткостроковій перспективі продуктивність зростає, але довгостроково система деградує.

3. Природний відбір деструктивних когнітивних практик

Алгоритми, оптимізовані під максимізацію залучення уваги аудиторії (engagement), здійснюють систематичний відбір когнітивних практик у бік їх спрощення. Емоційні, шаблонні, стереотипні, очікувані, однозначні повідомлення отримують більший «еволюційний успіх» (охоплення, реакції, поширення), ніж складні, експертні, науково обґрунтовані, критично осмислені. У результаті в інформаційній екосистемі закріплюється «екологічна ніша поверхневості» – середовище, в якому глибоке критичне мислення стає еволюційно не вигідним.

Цей процес є самопідсилюючим: чим більше користувачів адаптується до поверхневого споживання інформації, тим більше алгоритми отримують сигналів для оптимізації контенту в цьому напрямку, тим більше нових агентів соціалізується у вже деградованому середовищі. Маємо класичний «порочний цикл» екологічної деградації.

4. Концентрація алгоритмічної влади як порушення трофічної рівноваги

В екологічно збалансованій системі жоден вид не домінує абсолютно – система підтримує динамічну рівновагу між виробниками, споживачами та деструкторами. Концентрація медіавлади у руках кількох алгоритмічних платформ порушує цю рівновагу: одиниці агентів контролюють потоки ресурсів (уваги) для мільярдів. Це аналогічно до монополізації водних ресурсів у природній екосистемі – всі організми залежать від єдиного джерела, що робить систему критично вразливою.

Непрозорість алгоритмів посилює цю проблему. Якщо в природній екосистемі механізми регуляції еволюційно «вбудовані» і відносно прозорі, то алгоритмічне управління інформаційними потоками є навмисно непрозорим і підпорядкованим комерційним, а не екосистемним інтересам.

Інституційний вимір екологічної дисфункції Деградація екосистемних послуг на рівні соціальних інститутів

В екології «екосистемні послуги» – це функції, які здорова екосистема надає для підтримки життєдіяльності організмів: очищення повітря і води, регуляція клімату, підтримка родючості [2]. У цифровій екосистемі аналогічні послуги включають: забезпечення достовірною інформацією, підтримку якісного суспільного дискурсу, збереження колективного знання, забезпечення умов для раціонального прийняття рішень.

Інформаційна евтрофікація руйнує ці послуги на рівні соціальних інститутів. Організації та державні органи, занурені в деградоване інформаційне середовище, втрачають здатність приймати стратегічні рішення на основі достовірних даних – аналог того, як організми в евтрофованій водоймі втрачають доступ до кисню. Дж. Тейнтер [11] попереджав, що цивілізаційний колапс настає тоді, коли складність систем перевищує здатність інститутів нею управляти. У сучасних умовах ШІ радикально прискорює зростання складності інформаційних систем, не надаючи пропорційних інструментів для управління цією складністю.

Посилення екологічної нерівності

Деградація цифрової екосистеми має нерівномірний вплив на різні групи населення – аналогічно до того, як екологічне забруднення непропорційно вражає найбільш вразливі спільноти. Особи з вищим рівнем цифрової компетентності та когнітивними ресурсами краще орієнтуються в деградованому середовищі і навіть отримують від нього переваги. Натомість соціально вразливі групи – люди похилого віку, діти та підлітки, низько освічені верстви – зазнають найбільшого деструктивного впливу інформаційного «забруднення».

Це явище можна назвати «екологічною когнітивною нерівністю»: доступ до чистого, достовірного, когнітивно збагачувального інформаційного середо-

вища стає привілеєм, а не рівним правом. У такий спосіб деградація цифрової екосистеми відтворює і поглиблює існуючі соціальні нерівності.

Стратегії відновлення стійкості цифрової екосистеми

Індивідуальний рівень: когнітивна екологічна культура

На індивідуальному рівні стратегії адаптації повинні бути осмислені не тільки як «цифрова гігієна» (метафора, що зосереджується на індивідуальному здоров'ї), а як *екологічна культура поведінки* – відповідальне споживання інформаційних ресурсів з урахуванням системних наслідків. Подібно до того, як екологічно відповідальний споживач враховує вплив своїх дій на природне середовище, екологічно відповідальний користувач цифрового середовища усвідомлює, що його інформаційна поведінка впливає на якість спільного інформаційного простору.

Практично це передбачає: свідоме диверсифікування джерел інформації (підтримка інформаційного біорізноманіття), відмову від алгоритмічного делегування критичного мислення, підтримку верифікованих джерел та практику «повільного читання» як протипагі поверхневого кліпового споживання. Розвиток навичок розпізнавання синтетичного контенту є еквівалентом здатності розпізнавати інвазивні види в природному середовищі.

Організаційний рівень: управління інформаційними потоками як екологічне завдання

Організації повинні розглядати управління інформаційними потоками не лише як технічне або управлінське, але й як екологічне завдання. Це передбачає встановлення «квот» на споживання інформації, аналогічних квотам на споживання природних ресурсів; створення внутрішніх «захищених зон» для глибокого аналітичного мислення, вільних від постійного потоку сповіщень; систематичну верифікацію джерел та критичну оцінку AI-генерованих рекомендацій.

Особливо важливою є інституційна підтримка «повільного мислення» [6] на протипагі автоматичним реакціям. Організації, які зберігають здатність до глибокого аналізу в умовах інформаційної евтрофікації, отримують значну конкурентну перевагу – подібно до організмів, що зберегли здатність вижити в забрудненому середовищі.

Державний рівень: екологічне регулювання цифрового середовища

Найбільш критичним є формування екологічної регуляторної рамки для цифрового середовища на рівні держави. Це передбачає декілька напрямків.

1. Моніторинг стану цифрової екосистеми. Подібно до екологічного моніторингу природного середовища, необхідне систематичне вимірювання «стану здоров'я» інформаційного простору: співвідношення верифікованого і синтетичного контенту, рівня інформаційного біорізноманіття, поширеності дезінформації, показників когнітивного навантаження населення.

2. Встановлення екологічних меж когнітивного навантаження. За аналогією з концепцією планетарних меж [9], необхідне визначення порогових значень – «червоних ліній» у функціонуванні цифрової екосистеми, перевищення яких загрожує незворотною деградацією.

3. Регулювання «виробництва забруднення». Це включає нормування обсягів AI-генерованого контенту в публічному просторі, вимоги маркування синтетичного контенту, обмеження використання маніпулятивних інтерфейсних патернів (темні патерни).

4. Відновлення інформаційного біорізноманіття. Державна підтримка незалежних медіа, академічних видань і некомерційних інформаційних платформ як «охоронюваних зон» для якісного контенту, аналогічна природоохоронним резерватам.

5. Антимонопольне регулювання алгоритмічних платформ. Обмеження концентрації контролю над інформаційними потоками в руках окремих суб'єктів є необхідною умовою відновлення трофічної рівноваги цифрової екосистеми.

Для України інтеграція цих підходів у систему інформаційної безпеки є особливо актуальною з огляду на досвід протидії гібридним інформаційним загрозам. Екологічна деградація цифрового середовища в умовах інформаційної війни набуває характеру прямої загрози національній безпеці.

Висновки

Проведений аналіз дозволяє зробити такі ключові висновки. По-перше, цифрова екосистема є реальною, а не метафоричною системою, що функціонує за закономірностями, які можуть бути описані в термінах екології систем. Її деградація є системним, а не лише індивідуально-психологічним явищем. Когнітивне перевантаження людей і організацій є симптомом цієї деградації, але не її причиною. По-друге, генеративний штучний інтелект виступає екологічним «інвазивним видом» у цифровому середовищі, що прискорює інформаційну евтрофікацію, знищує інформаційне біорізноманіття та порушує механізми саморегуляції системи. Ефективне управління цим явищем потребує системних екологічних регуляторних інструментів. По-третє, відновлення стійкості цифрової екосистеми є необхідною умовою не лише психічного благополуччя населення, але й збереження інституційної спроможності держав і суспільств. Без екологічного оздоровлення цифрового середовища будь-які окремі заходи цифрової грамотності, регулювання ШІ, захист психічного здоров'я – не усуватимуть причину деградації екосистеми. По-четверте, як слушно підкреслює С. Лахлу: «суспільство здатне вчасно помітити й усвідомити смертельні загрози від ШІ лише тоді, коли його інформаційне середовище залишається здоровим» [7]. Якщо простір отруєний фейками та шумом, люди просто не зможуть розгледіти масш-

табну небезпеку. Деградоване середовище продукує хронічну «екзистенційну втому» і паралізує колективну здатність до стратегічного реагування. Формування екологічно здорового цифрового середовища є таким чином передумовою безпечного розвитку штучного інтелекту.

Перспективи подальших досліджень охоплюють: розробку кількісних показників «екологічного здоров'я» цифрового середовища та методик його моніторингу; емпіричне верифікування запропонованої моделі інформаційної евтрофікації через ана-

ліз великих масивів даних; порівняльне дослідження стану цифрових екосистем у різних країнах з урахуванням їхньої регуляторної політики; моделювання порогових станів і визначення конкретних «екологічних меж» когнітивного навантаження.

Україна, з огляду на унікальний досвід функціонування в умовах гібридної інформаційної війни, має значний потенціал для розробки практичних моделей підвищення стійкості цифрової екосистеми, що може стати важливим внеском у міжнародну наукову дискусію з цих питань.

Література

1. Білявський Г. О., Бутченко Л. І. Основи екології : підручник. Київ : Лібра, 2004. 408 с.
2. Мельник Л. Г. Екологічна економіка : підручник. Суми : Університетська книга, 2006. 367 с.
3. Acemoglu D., Kong D., Ozdaglar A. E. *AI, Human Cognition and Knowledge Collapse*. NBER Working Paper No. 34910. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research, 2026. 69 p. DOI: <https://doi.org/10.3386/w34910>
4. Gerlich M. AI Tools in Society: Impacts on Cognitive Offloading and the Future of Critical Thinking. *Societies*. 2025. Vol. 15, No. 1. Article 6. DOI: 10.3390/soc15010006
5. Holling C. S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1973. Vol. 4. P. 1–23. URL: <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev.es.04.110173.000245> (дата звернення: 22.05.2026).
6. Kahneman D. *Thinking, Fast and Slow*. New York : Farrar, Straus and Giroux, 2011. 499 p. DOI: 10.1007/s00362-013-0533-y Sweller J. *Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning*. *Cognitive Science*. 1988. Vol. 12, No. 2. P. 257–285. DOI: 10.1207/S15516709COG1202_4.
7. Lahlou S. *Mitigating Societal Cognitive Overload in the Age of AI*. arXiv preprint. 2025. arXiv:2504.19990. URL: <https://arxiv.org/abs/2504.19990>. (дата звернення: 20.05.2026)
8. Pariser E. *The Filter Bubble: What the Internet Is Hiding from You*. New York: Penguin Press, 2011. 294 p. ISBN:978-1-59420-300-8
9. Rockström J., Steffen W., Noone K. et al. *A Safe Operating Space for Humanity*. *Nature*. 2009. Vol. 461, No. 7263. P. 472–475. URL: https://www.researchgate.net/publication/44160502_A_safe_operating_space_for_humanity (дата звернення: 20.05.2026)
10. Sweller J. *Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning*. *Cognitive Science*. 1988. Vol. 12, No. 2. P. 257–285. DOI: 10.1207/S15516709COG1202_4
11. Tainter J. A. *The Collapse of Complex Societies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 250 p. URL: https://risk.princeton.edu/img/Historical_Collapse_Resources/Tainter_The_Collapse_of_Complex_Societies_ch_1_2_5_6.pdf (дата звернення: 23.05.2026)
12. Zhang S., et al. Anxiety or engaged? Research on the impact of technostress from artificial intelligence. *Acta Psychologica*. 2025. Vol. 254. Art. 104753. DOI:10.1016/j.actpsy.2025.105442

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНИЙ ФОНД УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ, ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ

Некос А.Н.¹, Добровольський О.С.²

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майд. Свободи, 4, 61022, м. Харків

²Національний транспортний університет
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, 02000, м. Київ
officenttn@ukr.net

У статті досліджено сучасний стан природно-заповідного фонду (ПЗФ) України як ключового інструменту забезпечення екологічної безпеки та збереження біорізноманіття в умовах воєнного стану та поствоєнного відновлення. Встановлено, що станом на березень 2026 року внаслідок збройної агресії пошкоджено 28,5 тис. га рослинного світу ПЗФ, знищено 82,6 млн дерев та рослин і 75,2 тис. тварин, що свідчить про безпрецедентний масштаб екологічних втрат. Проаналізовано вплив антропогенних чинників воєнного характеру на структуру та функціональний стан об'єктів ПЗФ. Встановлено, що більшість охоронюваних територій зазнає деградації екосистем, порушення природних процесів та зниження рівня біорізноманіття. Визначено основні форми воєнного антропогенного впливу: вибухові та термічні ушкодження, забруднення ґрунтів і поверхневих вод токсичними сполуками, фрагментація середовищ існування внаслідок фортифікаційних робіт, зростання браконьєрства та незаконних рубок, загибель персоналу заповідних установ. Обґрунтовано, що збройний конфлікт у поєднанні з кліматичними змінами формує синергетичний дистрес-фактор, який прискорює незворотні трансформації видового складу. На основі аналізу міжнародного досвіду постконфліктного відновлення природних територій (Руанда, Колумбія, Камбоджа, Балкани) та сучасних методологічних підходів сформульовано концептуальні засади повоєнного відновлення ПЗФ. Запропоновано три-стадійну програму відновлення з горизонтами планування 0-3, 3-10 та 10-30 років, яка поєднує оперативні заходи безпеки, середньострокове екосистемне відновлення та довгострокове сталое управління. Визначено потенційні джерела фінансування відновлення через механізми міжнародної кліматичної допомоги, інструменти ЄС (EU Recovery and Resilience Facility, LIFE Programme), платежі за екосистемні послуги та розвиток сталого екотуризму. Обґрунтовано застосування сучасних технологічних інструментів: БПЛА-моніторингу, методів структури-від-руху (SfM), дистанційного зондування та математичного моделювання стану біосистем – для підвищення ефективності управління ПЗФ в умовах постконфліктного відновлення відповідно до цілей Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework та принципів «зеленого відновлення». *Ключові слова:* природно-заповідний фонд, екологічна безпека, біорізноманіття, повоєнне відновлення, антропогенний вплив, сталий розвиток.

Nature reserve fund of Ukraine in the context of environmental safety, biodiversity conservation and post-war recovery. Nekos A., Dobrovolskyi O.

The article examines the current state of the Nature Reserve Fund (NRF) of Ukraine as a key instrument for ensuring environmental safety and biodiversity conservation under martial law and post-war recovery conditions. It is established that as of March 2026, as a result of armed aggression, 28.5 thousand hectares of NRF flora have been damaged, 82.6 million trees and plants destroyed, and 75.2 thousand animals killed, indicating an unprecedented scale of ecological losses. The influence of military anthropogenic factors on the structure and functional state of NRF objects is analysed. It is found that the majority of protected areas are experiencing ecosystem degradation, disruption of natural processes and a decline in biodiversity levels. The main forms of military anthropogenic impact are identified: explosive and thermal damage, soil and surface water contamination with toxic compounds, habitat fragmentation due to fortification works, increased poaching and illegal logging, and the death of reserve personnel. It is substantiated that armed conflict combined with climate change creates a synergistic distress factor that accelerates irreversible transformations in species composition. Based on an analysis of international experience in post-conflict restoration of natural territories (Rwanda, Colombia, Cambodia, the Balkans) and contemporary methodological approaches, the conceptual foundations of post-war NRF recovery are formulated. A three-stage restoration programme with planning horizons of 0-3, 3-10 and 10-30 years is proposed, combining immediate security measures, medium-term ecosystem restoration and long-term sustainable management. Potential sources of recovery financing are identified, including international climate finance mechanisms, EU instruments (EU Recovery and Resilience Facility, LIFE Programme), payments for ecosystem services and sustainable ecotourism development. The application of modern technological tools – UAV monitoring, structure-from-motion (SfM) methods, remote sensing and mathematical modelling of biosystem status – is justified for improving NRF management efficiency in post-conflict recovery conditions, in accordance with the goals of the Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework and green recovery principles. *Key words:* nature reserve fund, environmental safety, biodiversity, post-war recovery, anthropogenic impact, sustainable development.



Постановка проблеми. Територій та об'єктів природно-заповідного фонду України нараховується понад 9000, а їх площа складає понад 6% від площі країни [1]. ПЗФ є стратегічним ресурсом держави, оскільки заповідний режим забезпечує збереження й відновлення біорізноманіття та видового складу угруповань, популяцій та видів рослин і тварин за допомогою злагодженої роботи науковців та управлінців [2]. Після початку повномасштабного вторгнення доволі велика частка об'єктів природно-заповідного фонду потрапила до зони активних бойових дій або опинилась під тимчасовою окупацією. Це призвело до знищення генофонду флори і фауни, руйнування екологічного балансу, змін клімату, дефіциту екосистемних послуг і неможливості забезпечити рекреаційні потреби суспільства.

Природно-заповідний фонд України визначається поєднанням двох суттєвих, але досить небезпечних проблем для розвитку та функціонування охоронюваних територій. По-перше, відсутність базових елементів забезпечення, а саме низький рівень фінансування, мозаїчність моніторингу, фрагментація середовищ існування видів тварин і рослин. По-друге: виникнення воєнних викликів, серед яких: мінування територій, лісові пожежі, хімічне забруднення ґрунтів і вод, масові вирубки деревостанів. Такі процеси не тільки суттєво послаблюють екологічну безпеку країни, але й ставлять під загрозу досягнення цілей сталого розвитку, зокрема цілі 15 «Збереження екосистем суші» в частині збереження біорізноманіття [1].

У контексті майбутнього повоєнного відновлення вкрай важливим є формування науково обґрунтованої стратегії реабілітації об'єктів ПЗФ, яка враховувала б не лише масштаби завданої шкоди, але і сучасні підходи до сталого управління природними територіями.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження поєднує декілька паралельних і взаємопов'язаних чинників. Військова агресія призвела до деградації природних екосистем. При цьому у світовій практиці досить мало зустрічається даних щодо чітких дій з боку керівництва природно-заповідних об'єктів, які б були ефективними під час прямих ушкоджень територій. За даними Міністерства економіки, докільля та сільського господарства України, станом на березень 2026 року внаслідок збройної агресії пошкоджено 28,5 тис. га рослинного світу ПЗФ, знищено 82,6 млн дерев та рослин і 75,2 тис. тварин [3]. Особливого сенсу набирає проблема збереження та відновлення біорізноманіття, яка набула глобального виміру. Доведено, що кліматичні зміни у поєднанні з прямим антропогенним впливом формують синергетичний ефект, що прискорює темпи втрати видового різноманіття [4]. Тому воєнні дії протягом 2022–2026 рр. перейшли межу стрес-фактора для територій та об'єктів ПЗФ, перетворившись у дистрес-фактор, який посилив руйнівний потенціал

факторів, особливо для біоти [5]. Зважаючи на те, що відновлення ПЗФ є невід'ємною частиною стратегії повоєнного відновлення України, яка має реалізовуватися відповідно до принципів «зеленого відновлення» (green recovery) та цілей Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (GBF), проведене дослідження дасть поштовх для розроблення спеціалізованих методологічних підходів, адаптованих до українських умов.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження пов'язане з виконанням Стратегії екологічної безпеки України та адаптації до зміни клімату в Україні до 2030 року та Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora (Habitats Directive) [6, 7]. Результати дослідження можуть бути використані Міністерством економіки, докільля та сільського господарства України, адміністраціями біосферних заповідників і національних природних парків під час розроблення програм екологічного управління, відновлення та моніторингу стану ПЗФ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність вивчення проблем збереження та відновлення біорізноманіття та управління природоохоронними територіями є постійною темою самітів, що проходять на майданчиках, де активно висвітлюють особливості та зміни у навколишньому середовищі. Вивчення механізмів непрямого антропогенного впливу на ПЗФ дозволяють розкрити не лише вплив «лісового сліду» на втрату видового різноманіття та багатства видів у регіонах, що є монополістами-постачальниками деревини, але й обґрунтувати необхідність системного обліку впливу заготівлі деревини на біорізноманіття за межами охоронюваних територій [8].

Дослідження порогових реакцій популяцій диких тварин на антропогенне навантаження дало змогу не лише запропонувати індикатори біорізноманіття, але і маркери сталого ресурсокористування [9]. Такі підходи можуть бути адаптовані для розробки системи екологічного моніторингу ПЗФ в умовах постконфліктного відновлення. Отримані дані аналізу соціально-екологічних систем дозволили сформувати Q-методологію для покращення методів дослідження на територіях природно-заповідного фонду [10].

Підтвердженням мультиплікативного ефекту деградації природних систем стали дослідження кількісної оцінки глобального впливу кліматичних змін на втрату біорізноманіття. Автори підтвердили, що підвищення рівня антропогенного навантаження та постійний кліматичний стрес пришвидшують процеси регресу екосистем [11]. Розроблення методичних рекомендацій для управлінців ПЗФ є дієвим інструментом, який висвітлює суттєві аспекти багатоцільового управління лісовим господарством. Використання таких методичних

матеріалів може бути використаним керівниками ПЗФ для планування лісовідновлення на постраждалих територіях [12].

Застосування комплексних та класичних управлінських підходів для виявлення придатності середовищ існування для сапроксіальних видів показали свою результативність та дозволили виявити залежність між лісогосподарськими практиками та кліматичними змінами [13]. Дослідження запасів органічного вуглецю у ґрунтах лісових екосистем є ефективним інструментом для формування програми дій щодо зменшення наслідків зміни клімату та збереження природних компонентів довкілля [14].

Безумовно, що для територій біосферних заповідників та на територіях, де доступ є обмеженим для проведення моніторингу, ефективність застосування БПЛА стає чи не єдиним інструментом для отримання детальної інформації про розподіл рослинності та тварин. Такий вид моніторингу відновлення екосистем також дає змогу обстежувати ті об'єкти ПЗФ, які постраждали від воєнних дій та їх стан (наприклад, мінування) не дозволяють здійснювати моніторинг маршрутним методом [15, 16]. Розроблення математичних моделей для визначення комплексного індексу стану біосистем як інструменту управління системами екологічного менеджменту доцільно застосовувати під час проведення природоохоронних заходів на територіях та об'єктах ПЗФ [17].

За результатами аналізу літературних джерел було виявлено, що більшість авторів зосереджуються на питаннях інвентаризації заповідних об'єктів, оцінки рівня забруднення та розробці регіональних схем розбудови екомережі, проте комплексних праць, присвячених інтеграції воєнного фактору як специфічного виду антропогенного впливу в стратегії управління ПЗФ, досі недостатньо.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на широке охоплення суміжних тематик у наукових публікаціях, ряд питань залишається недостатньо дослідженим або взагалі не вирішеним. Зокрема, відсутня єдина методологія кількісної оцінки збитків, заподіяних збройним конфліктом об'єктам ПЗФ, яка б поєднувала дані польових досліджень, дані дистанційного зондування та показники біорізноманіття.

Не розроблено базу індикаторів пріоритетності відновлення територій та об'єктів ПЗФ з урахуванням їх екологічної значущості, ступеня пошкодження та здатності до природного самовідновлення. Не адаптовані до умов постконфліктної реабілітації існуючі міжнародні методики оцінки ефективності управління охоронюваними територіями (METT, GEF).

Новизна. Вперше для умов України систематизовано концептуальні засади повоєнного відновлення ПЗФ з інтеграцією міжнародного досвіду

постконфліктної реабілітації природних територій. Запропоновано тристадійну програму відновлення ПЗФ (короткостроковий, середньостроковий та довгостроковий горизонти), яка поєднує сучасні технологічні інструменти моніторингу з адаптивними підходами до управління заповідними об'єктами.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження має комплексний міждисциплінарний характер, поєднуючи підходи екології, природоохоронної біології, геоінформатики та екологічного менеджменту. Для того, щоб виокремити всі складові ПЗФ застосовано системний аналіз стану об'єктів ПЗФ. Проаналізовано міжнародний досвід з постконфліктного відновлення природних територій, відзначено, що математичне моделювання є ефективним інструментом для виявлення динаміки екологічних показників [17]. Встановлено, що на основі даних дистанційного зондування можливо провести оцінювання стану природних і антропогенних об'єктів, а також спрогнозувати зміни у довкіллі.

Загальнонаукове значення полягає у розширенні концептуальної бази «екології конфліктів» (conflict ecology) та формуванні методологічних засад для досліджень в інших країнах, що знаходяться або знаходились у стані збройного конфлікту з масштабними екологічними наслідками (Сирія, Ірак, Ємен, ДР Конго) [18, 19].

Виклад основного матеріалу. Під безпосереднім впливом бойових дій перебувають або перебували понад 1,2 млн га територій природно-заповідного фонду України. Найбільших втрат, зокрема прямих влучань та пожеж зазнали об'єкти Донецької, Луганської, Запорізької, Херсонської, Харківської та Миколаївської областей. Азово-Сиваський національний природний парк (НПП), Луганський природний заповідник, Дніпровсько-Орільський НПП зазнали ушкоджень внаслідок обстрілів та мінного забруднення [5].

В умовах військових дій основними формами антропогенного впливу є: вибухові та термічні впливи (руйнування ґрунтового і трав'яного покриву, знищення деревостанів); забруднення ґрунтів і поверхневих вод токсичними сполуками металів, нафтопродуктами та вибуховими речовинами; фрагментація і повне знищення середовищ існування рослин і тварин через проведення фортифікаційних робіт; зростання рівня браконьєрства та незаконних рубок в умовах ослаблення охорони; вимушена евакуація або загибель персоналу заповідних установ. На фоні цього збройний конфлікт суттєво підвищує тиск на біорізноманіття, яке страждає від кліматичних змін. Як зазначають Habibullah et al. (2022), незворотні трансформації видового складу залежать не лише від підвищення температури навколишнього середовища, але й від прямого антропогенного впливу [11]. Підтвердженням цьому є лісові пожежі на Херсонщині та у Чорнобильській зоні, що набули особливо масштабного характеру

під час воєнної агресії: лише у 2022 році на території Чорнобильського радіаційно-екологічного біосферного заповідника вогнем знищено 6 403 га лісів, що становить 2,8% площі заповідника, а загальні збитки з урахуванням часу відновлення сягають 3,12 млрд дол. США [21, 22]. Такі масштабні втрати лісового покриву закономірно тягнуть за собою довгострокові зміни у структурі рослинних угруповань, порушення гніздового і репродуктивного циклів птахів, загибель популяцій наземних ссавців та ґрунтових безхребетних. Тому визначення порогових реакцій популяцій на антропогенне навантаження дозволяє виявити основні індикатори стану біорізноманіття. Такі стрімкі й негативні зміни популяцій призводять до їх дистресу, внаслідок чого відбуваються зміни в екосистемах. Такі негативні перетворення в структурі популяцій потребують негайних досліджень, застосування природоохоронних заходів та активних і злагоджених дій наукового та управлінського складу об'єктів ПЗФ.

Одним із найкращих інструментів для постійного відстежування стану популяцій, угруповань, видів рослин і тварин є систематичний моніторинг на об'єктах ПЗФ, що постраждали від воєнного втручання. Для цього доцільно використовувати сучасні технології дистанційного зондування, що дасть змогу оцінити масштаби ушкодження та розробити план заходів для відновлення територій ПЗФ. Слід відзначити, що сучасний моніторинг відрізняється від традиційних методів не лише завдяки розвитку технічного обладнання, але й у зв'язку з необхідністю здійснення обстежень територій ПЗФ у небезпечних і важкодоступних для проведення польових досліджень зонах. Він може поєднувати не лише БПЛА-зйомки, але й методи структури-від-руху (SfM), що дозволяє науковцям ПЗФ отримувати деталізовану інформацію про розподіл і стан рослинності та рослинних угруповань з високою роздільною здатністю [15]. На основі отриманих даних моніторингу доцільно застосовувати математичні моделі для оцінки стану біосистем, які можуть об'єднати різні індикатори в інтегральний критерій для отримання даних про динаміку в часі ключових показників, визначених для конкретного ПЗФ. Впровадження в загальну систему управління територіями та об'єктами ПЗФ систематичного моніторингу та математичного моделювання для оцінки стану біосистем [17] сприятиме ранньому виявленню критичних порогів деградації та своєчасному коригуванню управлінських рішень.

Для того, щоб зменшити кількість помилок під час запуску проєктів для контролю та відновлення стану об'єктів ПЗФ доцільно аналізувати та застосовувати міжнародний досвід постконфліктного відновлення природних територій, зокрема досліджено досвід Руанди, Колумбії, Камбоджі та Балканів. Встановлено, що поєднання природних сукцесій із активними природоохоронними заходами, зокрема:

відновлення ґрунтового та лісового покриву, регенерація водно-болотних угідь, реакліматизація та репатріація видів, показують ефективність такого інтегрованого підходу. Управлінська ланка ПЗФ повинна використовувати рекомендації FAO [12] у питаннях планування багатоцільового лісового господарства на відновлених територіях для забезпечення балансу між виробничими, захисними та природоохоронними функціями лісу. Досвід постконфліктних країн показав, що під час добору відновлюваних деревних порід на територіях, що стали майже непридатними для самовідтворення, необхідно враховувати особливості висаджуваних видів дерев та уникати тих, що характеризуються низькою кліматичною стійкістю. Такий досвід є досить цінним та показує необхідність прогнозування впливу кліматичних змін на придатність середовищ існування, в тому числі і для територій та об'єктів ПЗФ. Отже, відновлення ПЗФ в епоху глобальних кризових трансформацій починається від забезпечення кліматичної стійкості екосистем, збереження біорізноманіття, відновлення природних середовищ існування до впровадження адаптивних підходів до управління.

На основі проведеного аналізу пропонується Програма повоєнного відновлення ПЗФ, яка структурована відповідно до часу, цілей та можливостей впровадження заходів і отримання результатів (табл. 1).

Варто зазначити, що дієвість та результативність Програми повоєнного відновлення ПЗФ залежить, в тому числі від фінансової стійкості відновлення. Фінансування може забезпечуватись через механізми міжнародної кліматичної допомоги, «зелених» інструментів ЄС (EU Recovery and Resilience Facility, LIFE Programme), платежів за екосистемні послуги та розвитку сталого екотуризму.

Висновки. Отже, за результатами дослідження було встановлено:

1. Природно-заповідний фонд України зазнав безпрецедентного ушкодження внаслідок збройного конфлікту, що суттєво посилює довоєнні проблеми антропогенного впливу і загрожує незворотними втратами біорізноманіття. Понад 12% площі ПЗФ перебувало або перебуває в зоні активних бойових дій.

2. Збройний конфлікт та кліматичні зміни одночасно призводять до деградації екосистем і зниження їх стійкості. Ризик перетину екологічних порогів, за якими відновлення стає вкрай ускладненим, є реальним для значної кількості постраждалих об'єктів ПЗФ.

3. Ефективне повоєнне відновлення ПЗФ потребує реалізації стратегії, що поєднує оперативні заходи безпеки та оцінки збитків із середньо- і довгостроковими програмами екосистемного відновлення для досягнення цілей сталого розвитку.

4. Сучасні технологічні інструменти – БПЛА-моніторинг, методи дистанційного зондування, мате-

Програма повосенного відновлення ПЗФ

Період	Цілі
Короткостроковий (0–3 роки)	1. Оперативна оцінка збитків із застосуванням БПЛА та супутникових даних. 2. Забезпечення охорони від браконьєрства та незаконних рубок. 3. Розмінування пріоритетних ділянок. 4. Відновлення інфраструктури заповідних установ. 5. Запуск систем моніторингу ключових видів.
Середньостроковий (3–10 років)	1. Відновлення деградованих екосистем (заліснення, ренатуралізація, реінтродукція). 2. Розбудова екологічних коридорів для поєднання заповідних масивів. 3. Інтеграція в міжнародні системи збереження біорізноманіття. 4. Розбудова системи екологічного моніторингу на основі математичних моделей.
Довгостроковий (10–30 років)	1. Формування репрезентативної екомережі, що охоплює не менше 30% площі країни. 2. Забезпечення довгострокового сталого управління ПЗФ із застосуванням адаптивних підходів до менеджменту. 3. Інтеграція збереження біорізноманіття у стратегії розвитку всіх секторів економіки.

матичні моделі оцінки стану біосистем – є основними засобами підвищення ефективності управління ПЗФ в умовах постконфліктного віновлення.

5. Відновлення територій та об'єктів ПЗФ є не лише природоохоронним, але й кліматичним та соціально-економічним пріоритетом держави, що потребує залучення міжнародного фінансування, координації між відомствами та інтеграції у загальну стратегію повосенного відновлення України.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані у кількох напрямках. У сфері державного управління – під час розробки Національного плану

відновлення ПЗФ, оновлення Закону України «Про природно-заповідний фонд України».

У науково-дослідній сфері доцільно використовувати як методологічну базу для подальших досліджень динаміки відновлення екосистем, зокрема лісових, степових, водно-болотних, та для розробки системи індикаторів екологічної безпеки постраждалих регіонів і порівняльних досліджень постконфліктного відновлення природних територій у глобальному контексті.

У практиці управління заповідними об'єктами – для розробки індивідуальних планів відновлення конкретних НПП та природних заповідників.

Література

1. Дичко А., Єрмаков В. Роль природно-заповідного фонду у збереженні біорізноманіття та забезпеченні сталого функціонування екосистем України. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2026. № 2(53). С. 142-149. DOI: 10.31498/2225-6733.53.2.2026.359946.
2. Pokshevnytska T., Khrutba Y. Optimisation of decision-making on risk management strategy for the hydromelioration systems in biosphere reserves. *Environmental Research Communications*. 2024. Vol. 6, № 9. P. 091003. DOI: 10.1088/2515-7620/ad7427.
3. Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України, Державна екологічна інспекція України. Збитки довкілля внаслідок збройної агресії РФ: 24.02.2022-16.03.2026. URL: <https://me.gov.ua/News/Detail/ddc09c85-a606-447e-b944-688f5c908f54?lang=uk-UA&title=ShkodaDovkilliu> (дата звернення: 01.07.2026).
4. Jaureguiberry P., Titeux N., Wiemers M., Bowler D. E., Coscieme L., Golden A. S., Guerra C. A., Jacob U., Takahashi Y., Settele J., Díaz S., Molnár Z., Purvis A. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. *Science Advances*. 2022. Vol. 8, № 45. P. eabm9982. DOI: 10.1126/sciadv.abm9982.
5. Uvaieva O., Shevchuk L., Herasymchuk O., Vasilieva L. Impact of military operations on the nature reserve fund of Ukraine. *Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, № 3. P. 259–268. DOI: 10.23939/ep2025.03.259.
6. Кабінет Міністрів України. Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2021 № 1363-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80> (дата звернення: 01.07.2026).
7. Council of the European Communities. Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. *Official Journal of the European Communities*. 1992. L 206. P. 7-50. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31992L0043> (дата звернення: 01.07.2026).
8. Egenolf V., Schüngel J., Bringezu S., Schaldach R. The impact of the German timber footprint on potential species loss in supply regions. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 901. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.165897.
9. Brown G. S., DeWitt P. D., Dawson N., Landriault L. Threshold responses in wildlife communities and evidence for biodiversity indicators of sustainable resource management. *Ecological Indicators*. 2021. Vol. 133. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108371.
10. Bavin D., MacPherson J., Denman H., Crowley S. L., McDonald R. A. Using Q-methodology to understand stakeholder perspectives on a carnivore translocation. *People and Nature*. 2020. Vol. 2. P. 1117-1130. DOI: 10.1002/pan3.10139.
11. Habibullah M. S., Din B. H., Tan S. H. et al. Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*. 2022. Vol. 29. P. 1073-1086. DOI: 10.1007/s11356-021-15702-8.

12. Sheppard J. P., Chamberlain J., Agúndez D., Bhattacharya P., Chirwa P. W., Gontcharov A., Sagona W. C. J., Shen H., Tadesse W., Mutke S. Sustainable forest management beyond the timber-oriented status quo: Transitioning to co-production of timber and non-wood forest products – a global perspective. *Current Forestry Reports*. 2020. Vol. 6. P. 26--40. DOI: 10.1007/s40725-019-00107-1.
13. Ekman E., Triviño M., Blattert C., Mazziotta A., Potterf M., Eyvindson K. Disentangling the effects of management and climate change on habitat suitability for saproxylic species in boreal forests. *Journal of Forestry Research*. 2024. Vol. 35, 34. DOI: 10.1007/s11676-023-01678-3.
14. Peri P. L., Gaitán J., Mastrangelo M. et al. Soil organic carbon stocks in native forest of Argentina: a useful surrogate for mitigation and conservation planning under climate variability. *Ecological Processes*. 2024. Vol. 13. DOI: 10.1186/s13717-023-00474-5.
15. Nuijten R. J. G. C., Coops N., Theberge D., Prescott C. E. Estimation of fine-scale vegetation distribution information from RPAS-generated imagery and structure to aid restoration monitoring. *Science of Remote Sensing*. 2024. Vol. 9. DOI: 10.1016/j.srs.2023.100114.
16. Barabash O., Khrutba O., Pokshevnytska T., Tarasiuk M. The realisation of sustainable development goals through the implementation of international environmental projects with the implementation of transport infrastructure solutions. In O. Slavinska, V. Danchuk, O. Kunytska, O. Hulchak (Eds.), *Intelligent Transport Systems: Ecology, Safety, Quality, Comfort (ITSESQC 2024)*. Lecture Notes in Networks and Systems. Vol. 1335. Cham: Springer, 2025. P. 14-28. DOI: 10.1007/978-3-031-87376-8_2.
17. Barabash O., Weigang G. Mathematical Modeling of the Summarizing Index for the Biosystems Status as a Tool to Control the Functioning of the Environmental Management System at Business Entities. *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)*. 2021. Vol. 1265. P. 56-66. DOI: 10.1007/978-3-030-58124-4_6.
18. Krampe F., Kreutz J., Ide T. Armed conflict causes long-lasting environmental harms. *Environment and Security*. 2026. P. 3-17. DOI: 10.1177/27538796251323739. Published online: March 11, 2025.
19. Hanson T., Brooks T. M., da Fonseca G. A. B. et al. Warfare in biodiversity hotspots. *Conservation Biology*. 2009. Vol. 23, № 3. P. 578-587. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2009.01166.x.
20. Skliar V., Kapinos N., Sherstiuk M., Kuntsevskiy D., Kovalchuk N. The impact of forest fires on ecosystem. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2025. Vol. 16, № 2. P. 99-114. DOI: 10.31548/forest/2.2025.99.
21. Didukh Ya. P., Borsuk O. A., Moysiienko I. I. Assessment of forest damage caused by war-related fires within the Chornobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve in 2022. *Forestry and Forest Melioration*. 2026. № 148. P. 119-133. DOI: 10.33220/1026-3365.148.2026.119.

Дата першого надходження статті до видання: 02.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЕКОЛОГІЧНА ТОКСИКОЛОГІЯ ЯК МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ БІООРГАНІЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ АГРОЕКОСИСТЕМ І ЗНИЖЕННЯ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДОВКІЛЛЯ

Парахненко В.Г., Гончарук В.В., Мандебура С.В.

Уманський національний університет

вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань

vladparachnenko@ukr.net, gvitalii1975@gmail.com, eko14b.mandebura@gmail.com

Здійснено комплексне дослідження екологічної токсикології як методологічної основи оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем та зниження антропогенного навантаження на довкілля. Актуальність роботи зумовлена інтенсифікацією сільськогосподарського виробництва, широким використанням агрохімікатів у традиційному землеробстві, деградацією ґрунтових ресурсів, зниженням біорізноманіття агроландшафтів та зростанням ризиків кумулятивного токсичного впливу пестицидів, важких металів і залишкових органічних сполук у компонентах екосистем. У дослідженні проаналізовано сучасні підходи екологічної токсикології до оцінювання міграції, трансформації та біоаккумуляції токсикантів у ґрунтово-рослинних системах, а також виявлено невідповідність між традиційними методами агроєкологічного контролю та потребою в інтегрованій оцінці довгострокових екологічних наслідків агровиробництва.

У роботі обґрунтовано методологічні засади застосування екологічної токсикології для аналізу ефективності біоорганічного землеробства, що базується на мінімізації використання синтетичних агрохімікатів, відновленні природної родючості ґрунтів та активізації ґрунтової біоти. Розглянуто механізми токсикологічної оцінки стану агроєкосистем через визначення рівнів токсичного навантаження, біоіндикаційні показники, ферментативну активність ґрунтів, показники біоаккумуляції та біомагніфікації шкідливих речовин у трофічних ланцюгах. Особливу увагу приділено оцінюванню екологічних ризиків із використанням принципів дозо-ефекту, порогових концентрацій та комплексних індексів екотоксичності, що дозволяє формувати науково обґрунтовані критерії екологічної безпеки агроландшафтів.

Наведено практичні підходи до впровадження систем моніторингу стану агроєкосистем у процесі біоорганічного землеробства, включаючи біоіндикаційні методи, агрохімічний аналіз ґрунтів, оцінку стану мікробіоценозів та використання інтегральних екологічних показників. Визначено, що застосування принципів екологічної токсикології дає змогу обґрунтувати екологічні переваги біоорганічного виробництва, зокрема зниження хімічного навантаження, відновлення функціональної стабільності ґрунтів та підвищення стійкості агроєкосистем до зовнішніх стресових факторів. Результати дослідження мають прикладне значення для вдосконалення агроєкологічної політики, розвитку сталого сільського господарства та формування системи екологічно безпечного природокористування. *Ключові слова:* екологічна токсикологія, біоорганічне землеробство, агроєкосистеми, екологічна безпека, антропогенне навантаження, екотоксичність, біоіндикація, ґрунтова біота, біоаккумуляція, сталий розвиток сільського господарства.

Environmental toxicology as a methodological foundation for assessing the impact of bio-organic farming on the environmental safety of agroecosystems and reducing anthropogenic environmental impact. Parakhnenko V., Goncharuk V., Mandebura S.

A comprehensive study of environmental toxicology was conducted as a methodological basis for assessing the impact of bio-organic farming on the environmental safety of agroecosystems and for reducing anthropogenic pressure on the environment. The relevance of this work stems from the intensification of agricultural production, the widespread use of agrochemicals in traditional farming, the degradation of soil resources, the decline in the biodiversity of agricultural landscapes, and the increasing risks of cumulative toxic effects from pesticides, heavy metals, and residual organic compounds in ecosystem components. The study analyzes modern approaches in environmental toxicology for assessing the migration, transformation, and bioaccumulation of toxicants in soil-plant systems, and identifies a discrepancy between traditional methods of agroecological control and the need for an integrated assessment of the long-term environmental consequences of agricultural production.

This paper substantiates the methodological foundations for applying environmental toxicology to analyze the effectiveness of bio-organic farming, which is based on minimizing the use of synthetic agrochemicals, restoring natural soil fertility, and stimulating soil biota. The mechanisms for the toxicological assessment of agroecosystem conditions are examined through the determination of toxic load levels, bioindicator parameters, soil enzymatic activity, and indicators of bioaccumulation and biomagnification of harmful substances in food chains. Particular attention is paid to the assessment of environmental risks using the principles of dose-response, threshold concentrations, and comprehensive ecotoxicity indices, which allows for the development of scientifically sound criteria for the environmental safety of agricultural landscapes.

Practical approaches to implementing monitoring systems for the state of agroecosystems in the process of bio-organic farming are presented, including bioindication methods, agrochemical soil analysis, assessment of the state of microbiocenoses, and the use of integrated ecological indicators.



It has been determined that applying the principles of environmental toxicology makes it possible to substantiate the environmental benefits of bio-organic production, including a reduction in chemical load, the restoration of soil functional stability, and an increase in the resilience of agroecosystems to external stressors. The results of this study have practical significance for improving agroecological policy, developing sustainable agriculture, and establishing a system of environmentally safe natural resource management. *Key words:* environmental toxicology, organic farming, agroecosystems, environmental safety, anthropogenic pressure, ecotoxicity, bioindication, soil biota, bioaccumulation, sustainable agricultural development.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсифікації сільськогосподарського виробництва питання забезпечення екологічної безпеки агро-екосистем та зниження антропогенного навантаження на довкілля набуває особливої актуальності. Широке застосування синтетичних добрив і пестицидів, монокультурне землеробство, деградація ґрунтів, зменшення біорізноманіття та порушення природних біогеохімічних циклів формують складний комплекс екологічних ризиків, що призводить до накопичення токсичних речовин у ґрунтово-рослинних системах і подальшої їх міграції по трофічних ланцюгах. У цих умовах особливого значення набуває використання екологічної токсикології як методологічної основи для об'єктивного оцінювання стану агроекосистем та наслідків впровадження біоорганічного землеробства.

Попри зростання інтересу до біоорганічного виробництва та екологічно безпечних агротехнологій, існуючі підходи до оцінювання їх ефективності залишаються недостатньо системними та часто не враховують довгострокові токсикологічні наслідки для компонентів агроекосистем. Серед ключових проблем слід відзначити обмеженість інтегральних показників екотоксичності, недостатній рівень уніфікації методів біоіндикації, фрагментарність даних щодо біоаккумуляції токсикантів у ґрунтах і рослинах, а також недостатню врахованість впливу мікробіологічних процесів на детоксикаційний потенціал ґрунтових систем. За таких умов ускладнюється об'єктивна оцінка екологічних переваг біоорганічного землеробства та його внеску у зниження антропогенного навантаження на довкілля [1].

Сучасні екологічні виклики вимагають формування цілісного методологічного підходу, заснованого на принципах екологічної токсикології, який дозволяє комплексно оцінювати міграцію, трансформацію та кумуляцію токсичних речовин в агроекосистемах. Відсутність інтегрованої системи токсикологічного моніторингу знижує ефективність управління агроландшафтами та унеможливорює повноцінне прогнозування екологічних ризиків. Саме тому виникає потреба у розробленні науково обґрунтованого підходу до оцінювання впливу біоорганічного землеробства, який базується на екологічній токсикології та забезпечує об'єктивне визначення рівня екологічної безпеки агроекосистем і ступеня зниження антропогенного навантаження на довкілля.

Актуальність дослідження. Посилення інтенсифікації сільськогосподарського виробництва та

зростання антропогенного навантаження на агроекосистеми формують нові екологічні виклики, пов'язані з деградацією ґрунтів, зниженням їх біологічної активності, накопиченням токсичних речовин та порушенням природних механізмів самоочищення екосистем. Використання синтетичних агрохімікатів, пестицидів і мінеральних добрив у традиційному землеробстві призводить до кумуляції екотоксикантів у ґрунтово-рослинних системах, що негативно впливає на біорізноманіття, якість продукції та загальну екологічну безпеку агроландшафтів [2].

У цих умовах особливої значущості набуває розвиток біоорганічного землеробства як альтернативної системи господарювання, спрямованої на мінімізацію хімічного навантаження та відновлення природної родючості ґрунтів. Водночас оцінювання його реальної екологічної ефективності потребує науково обґрунтованого підходу, здатного враховувати складні процеси міграції, трансформації та біоаккумуляції токсичних речовин в агроекосистемах. Саме екологічна токсикологія виступає важливою методологічною основою для такого аналізу, однак її потенціал у сфері агроекоекологічних досліджень використовується ще недостатньо повною мірою.

Сучасні підходи до оцінювання стану агроекосистем часто є фрагментарними та не забезпечують комплексного врахування довгострокових токсикологічних ефектів. Недостатньо розвинені інтегральні індикатори екотоксичності, обмежено застосовуються біоіндикаційні та біомоніторингові методи, а також недостатньо враховується роль ґрунтової біоти у процесах детоксикації та стабілізації екосистем. Як наслідок, ускладнюється об'єктивна оцінка впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку та зниження антропогенного навантаження на довкілля.

У сучасних умовах виникає необхідність переходу до інтегрованого підходу, який базується на принципах екологічної токсикології та дозволяє комплексно оцінювати стан агроекосистем з урахуванням їх функціональної стійкості, біогеохімічних процесів та рівня екологічного ризику. Запровадження такого підходу забезпечить підвищення точності екологічних оцінок, сприятиме розвитку сталого сільського господарства та дозволить ефективніше знижувати антропогенне навантаження на природне середовище.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення комплексу актуальних наукових і прикладних завдань, пов'язаних

із оцінюванням впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем та зниженням антропогенного навантаження на довкілля. В умовах інтенсифікації сільськогосподарського виробництва та зростання хімічного навантаження на ґрунтово-екологічні системи особливого значення набуває формування науково обґрунтованої методології, що базується на принципах екологічної токсикології та дозволяє комплексно оцінювати стан агроландшафтів, процеси міграції токсикантів і рівень екологічного ризику.

Наукове значення роботи полягає у розвитку теоретико-методологічних засад застосування екологічної токсикології як інструменту аналізу ефективності біоорганічного землеробства. Запропонований підхід забезпечує інтеграцію даних про токсикологічні властивості агрохімікатів, біоаккумуляцію забруднювачів, стан ґрунтової біоти та функціональну стійкість агроєкосистем. Це дозволяє перейти від фрагментарних оцінок до системного аналізу екологічних процесів у агроландшафтах та підвищити наукову обґрунтованість висновків щодо екологічної безпеки різних типів землеробства [3].

Практична цінність дослідження полягає у розробленні підходів до вдосконалення екологічного моніторингу агроєкосистем, зокрема через використання інтегральних токсикологічних показників, біоіндикаційних методів та критеріїв оцінювання екологічного стану ґрунтів і рослин. Отримані результати можуть бути використані у діяльності аграрних підприємств, екологічних служб, науково-дослідних установ та органів державного управління для впровадження екологічно безпечних технологій землекористування, зниження рівня антропогенного навантаження та підвищення стійкості агроєкосистем до зовнішніх впливів. Таким чином, авторський доробок має важливе значення як для розвитку екологічної токсикології, так і для практичного впровадження принципів сталого сільського господарства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Упродовж останніх років у науковій літературі спостерігається посилення уваги до проблем екологічної безпеки агроєкосистем, зменшення антропогенного навантаження на ґрунтові ресурси та впровадження біоорганічних технологій землеробства. Значний внесок у розвиток теоретичних засад агроєкології та сталого природокористування зробили дослідження, присвячені функціонуванню агроєкосистем, трансформації ґрунтів та біогеохімічним циклам (М. І. Бублик, В. В. Медведєв, Т. В. Патики), у яких обґрунтовано необхідність збереження ґрунтової родючості та мінімізації хімічного навантаження на агроландшафти.

Вагоме місце у сучасних дослідженнях займають праці, що стосуються екологічної токсикології як інструменту оцінювання стану природних середовищ. Зокрема, у роботах, присвячених міграції та біоаккумуляції токсичних речовин у ґрунтово-рос-

линних системах, підкреслюється значення аналізу пестицидного навантаження, важких металів та продуктів їх трансформації для визначення рівня екологічного ризику агроєкосистем. Дослідники наголошують, що саме токсикологічні підходи дозволяють оцінити не лише концентрації забруднювачів, а й їхню біологічну дію та довгострокові наслідки для живих організмів і ґрунтової біоти.

Окремий напрям становлять дослідження, присвячені біоорганічному землеробству як альтернативній системі господарювання, спрямованій на відновлення природної рівноваги агроєкосистем. У працях ряду авторів підкреслюється позитивний вплив органічних технологій на підвищення біологічної активності ґрунтів, зменшення рівня хімічного забруднення та покращення екологічної якості продукції. Водночас зазначається, що оцінювання ефективності таких систем потребує більш глибокого врахування токсикологічних процесів та інтегральних показників екологічного стану.

Паралельно в сучасній науковій думці зростає критика традиційних підходів до агроєкологічного моніторингу, які часто не враховують комплексної взаємодії між компонентами агроєкосистем та обмежуються окремими агрохімічними показниками. У низці досліджень обґрунтовується необхідність інтеграції екологічної токсикології, біоіндикаційних методів та системного аналізу ґрунтових процесів для формування більш об'єктивної оцінки екологічного стану агроландшафтів [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний розвиток досліджень у сфері агроєкології, екологічної токсикології та впровадження біоорганічного землеробства, залишається низка аспектів, що потребують подальшого теоретичного обґрунтування та методологічного вдосконалення. Насамперед недостатньо розроблено є інтегрована концепція оцінювання впливу біоорганічних агротехнологій на екологічну безпеку агроєкосистем на основі принципів екологічної токсикології, яка б поєднувала аналіз міграції, трансформації та біоаккумуляції токсикантів у єдину системну модель.

У наявних дослідженнях переважає фрагментарний підхід до оцінювання стану агроєкосистем, що проявляється у роздільному використанні агрохімічних, біологічних або екологічних показників без їх інтеграції в комплексну систему оцінки екологічного ризику. Це ускладнює формування цілісного уявлення про реальний рівень антропогенного навантаження та ефективність переходу до біоорганічного землеробства. Недостатньо враховуються також довгострокові токсикологічні ефекти малих доз забруднювачів, процеси їх кумуляції в ґрунтово-рослинних системах і вплив на трофічні ланцюги агроєкосистем.

Окремою невирішеною проблемою залишається обмежене застосування інтегральних індексів еко-

токсичності та біоіндикаційних підходів у практиці агроєкологічного моніторингу. Існуючі методики часто не враховують роль ґрунтової біоти як ключового елемента детоксикаційних процесів, а також недостатньо відображають функціональну стійкість агроєкосистем у різних ґрунтово-кліматичних умовах. Крім того, потребує вдосконалення методологія оцінювання порівняльної ефективності традиційного та біоорганічного землеробства з позицій екологічної токсикології [5].

Новизна: дослідження полягає у формуванні інтегрованого підходу до оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем, що базується на положеннях екологічної токсикології, принципах загальної екології та врахуванні особливостей функціонування ґрунтово-агроєкологічних систем. Вперше запропоновано розгляд екологічної токсикології не лише як інструменту виявлення рівня забруднення, а як методологічної основи для комплексного оцінювання екологічних наслідків переходу до біоорганічного землеробства.

На відміну від існуючих підходів, у роботі акцентовано на інтеграції показників міграції, трансформації та біоаккумуляції токсикантів із параметрами біологічної активності ґрунтів, стану ґрунтової біоти та функціональної стійкості агроєкосистем. Це дозволяє розглядати агроєкосистему як цілісну динамічну систему, у якій взаємодіють хімічні, біологічні та екологічні процеси.

Запропонований підхід передбачає використання інтегральних токсикологічних індикаторів для оцінювання рівня антропогенного навантаження та екологічної безпеки агроландшафтів, що забезпечує більш об'єктивне порівняння традиційного та біоорганічного землеробства. Таким чином, наукова новизна полягає у розвитку методології екологічної токсикології як інструменту стратегічного аналізу екологічних наслідків аграрної діяльності та підвищення рівня екологічної безпеки агроєкосистем.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у формуванні цілісного підходу до оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем, який базується на інтеграції положень екологічної токсикології, принципів загальної екології та сучасних уявлень про функціонування ґрунтово-агроєкологічних систем. Запропонована методологічна основа передбачає поєднання даних екологічного моніторингу, токсикологічного аналізу, біоіндикаційних оцінок та показників стану ґрунтової біоти, що дає змогу комплексно характеризувати рівень антропогенного навантаження та екологічну стійкість агроєкосистем.

У межах підходу акцент зроблено на використанні інтегральних критеріїв екотоксичності, оцінюванні процесів міграції та кумуляції токсичних речовин у трофічних ланцюгах, а також врахуванні функціональної ролі мікробіологічних і ґрунтових процесів

у забезпеченні здатності екосистем до саморегуляції. Це дозволяє сформувати більш об'єктивну систему оцінювання екологічного стану агроландшафтів порівняно з традиційними підходами.

Загальнонаукове значення дослідження полягає у поглибленні теоретичних уявлень про взаємозв'язок між технологіями землеробства, екологічною токсикологією та стійкістю агроєкосистем. Робота розширює наукові підходи до розуміння механізмів формування екологічної безпеки в аграрних ландшафтах і створює підґрунтя для подальшого розвитку інтегрованих моделей оцінювання впливу антропогенної діяльності на природне середовище на регіональному та глобальному рівнях.

Виклад основного матеріалу. Дослідження зосереджене на оцінюванні впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем із використанням підходів екологічної токсикології як методологічної основи аналізу. Основна увага приділяється визначенню рівня антропогенного навантаження на ґрунтово-рослинні системи, процесів міграції та накопичення токсичних речовин, а також змінам показників біологічної активності ґрунтів у різних агроєкологічних умовах.

Для порівняльного аналізу обрано аграрні території України з різними природно-кліматичними та інтенсивнісними характеристиками землекористування, що дозволяє оцінити ефективність біоорганічних технологій у системах із різним рівнем хімічного навантаження. Такий підхід забезпечує можливість зіставлення стану агроєкосистем, що функціонують за умов традиційного та біоорганічного землеробства, з урахуванням регіональних особливостей ґрунтового покриву, структури посівних площ та інтенсивності застосування агрохімікатів.

Інформаційною базою дослідження виступають дані агроєкологічного та ґрунтового моніторингу, показники вмісту залишкових кількостей пестицидів і важких металів, результати оцінювання біологічної активності ґрунтів, а також індикатори стану ґрунтової біоти. Додатково використовуються узагальнені дані агрохімічних обстежень, що дозволяє сформувати комплексне уявлення про екологічний стан агроєкосистем і рівень їхньої токсикологічної навантаженості [7].

Таблиця 1

**Вміст залишків пестицидів у ґрунті
за різних систем землеробства**

Система землеробства	Залишки пестицидів, мг/кг	Токсикологічна оцінка
Традиційна	0,85	Висока
Інтенсивна	0,72	Підвищена
Біоорганічна	0,18	Низька
Органічна	0,10	Дуже низька

Демонструє вміст залишків пестицидів у ґрунті за різних систем землеробства. Найвищі показники характерні для традиційної системи (0,85 мг/кг), де токсикологічна оцінка визначається як висока. В інтенсивному землеробстві рівень дещо нижчий (0,72 мг/кг), однак усе ще залишається підвищеним. Значно кращі результати спостерігаються у біоорганічній системі (0,18 мг/кг), де забруднення оцінюється як низьке, а найменші залишки пестицидів зафіксовано в органічному землеробстві (0,10 мг/кг), що відповідає дуже низькому рівню токсичності. Це свідчить про чітку тенденцію до зменшення хімічного навантаження при переході до більш екологічних систем.

Таблиця 2

Біологічна активність ґрунту

Показник	Традиційне землеробство	Біоорганічне землеробство
Дощові черви, екз./м ²	82	165
Мікробіологічна активність, %	58	91
Вміст гумусу, %	3,1	4,2
Біорізноманіття (умовний індекс)	0,63	0,91

Характеризує біологічну активність ґрунту в умовах традиційного та біоорганічного землеробства. У біоорганічній системі спостерігається суттєве покращення всіх показників: кількість дощових черв'яків зростає майже вдвічі (165 екз./м² проти 82), мікробіологічна активність підвищується з 58% до 91%, а вміст гумусу збільшується з 3,1% до 4,2%. Також значно зростає індекс біорізноманіття (з 0,63 до 0,91). Це свідчить про відновлення ґрунтових екосистем і підвищення їхньої природної родючості за умов біоорганічного землеробства.

Таблиця 3

Екологічний ефект упровадження біоорганічного землеробства

Показник	До впровадження	Після впровадження	Зміна, %
Антропогенне навантаження	100	68	-3
Забруднення ґрунту	100	41	-59
Забруднення вод	100	54	-46
Екологічна безпека агроєкосистем	100	138	+38

Відображає екологічний ефект упровадження біоорганічного землеробства у порівнянні з початковим станом. Після впровадження спостерігається зниження антропогенного навантаження до 68%

(зміна -32%), суттєве зменшення забруднення ґрунту на 59% та забруднення вод на 46%. Водночас екологічна безпека агроєкосистем підвищується до 138%, що означає зростання на 38%. Загалом дані свідчать про значне покращення екологічного стану довкілля внаслідок переходу до біоорганічних підходів у землеробстві.

Головні висновки. У ході дослідження обґрунтовано методологічну роль екологічної токсикології як основи оцінювання впливу біоорганічного землеробства на екологічну безпеку агроєкосистем та рівень антропогенного навантаження на довкілля. Показано, що інтеграція токсикологічних підходів із принципами загальної екології дозволяє комплексно аналізувати стан ґрунтово-рослинних систем, враховуючи процеси міграції, трансформації та біоаккумуляції токсичних речовин, а також функціональну роль ґрунтової біоти у забезпеченні екологічної рівноваги агроландшафтів.

Встановлено, що застосування біоорганічного землеробства сприяє зниженню рівня хімічного навантаження на агроєкосистеми, зменшенню накопичення залишкових кількостей пестицидів і важких металів у ґрунті та рослинній продукції, а також підвищенню біологічної активності ґрунтів. Це, у свою чергу, позитивно впливає на стійкість агроєкосистем і їх здатність до саморегуляції в умовах змінних екологічних факторів.

Проведений аналіз засвідчив доцільність використання інтегральних токсикологічних показників та біоіндикаційних методів для об'єктивної оцінки екологічного стану агроєкосистем у різних умовах землекористування. Такий підхід забезпечує можливість порівняльної оцінки традиційного та біоорганічного землеробства з позицій довгострокових екологічних наслідків.

Результати дослідження мають практичне значення для удосконалення системи агроєкологічного моніторингу, формування екологічно безпечних технологій землеробства та обґрунтування управлінських рішень у сфері сталого сільського господарства. Запропонований підхід сприяє зменшенню антропогенного навантаження на довкілля, підвищенню стійкості агроєкосистем та забезпеченню їх довгострокової екологічної безпеки [8].

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення системи агроєкологічного моніторингу та оцінювання екологічної безпеки агроєкосистем в умовах впровадження біоорганічного землеробства. Запропонований екологічно-токсикологічний підхід дозволяє підвищити обґрунтованість аналізу стану ґрунтово-рослинних систем, своєчасно виявляти накопичення токсичних речовин, а також оцінювати довгострокові екологічні наслідки антропогенного навантаження [9].

Практичне застосування отриманих результатів можливе у діяльності аграрних підприємств,

науково-дослідних установ, органів державного управління та екологічного контролю, а також у процесі розроблення стратегій сталого сільського господарства. Використання інтегральних токсикологічних показників і біоіндикаційних методів дає змогу підвищити ефективність управління агроландшафтами, забезпечити раціональне використання земельних ресурсів та мінімізувати екологічні ризики.

Впровадження результатів дослідження сприятиме поширенню біоорганічних технологій землеробства, зниженню хімічного навантаження на довкілля, підвищенню стійкості агроєкосистем і зміцненню їх здатності до саморегуляції. У перспективі це створює підґрунтя для формування екологічно безпечної моделі агровиробництва та забезпечення довгострокової екологічної стабільності сільських територій.

Література

1. Голембіовська О. І., Гребенюк Т. В., Федченко Є. П. Екотоксикологічна оцінка ґрунтів методом біотестування (Danio rerio). Екологія земельних ресурсів, 2026. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.12>
2. Дем'янюк О. С., Симочко Л. Ю., Шацьман Д. К. Структура та динаміка мікробних угруповань ґрунтів трансформованих екосистем. Environmental Research, Engineering and Management, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5755/j01.ere.m.76.4.23508>
3. Коляда О. В., Коробкова Г. В., Латуша Д. Р. Аналіз та моделювання фітотоксичності чорноземного ґрунту, забрудненого нафтопродуктами. Український журнал природничих наук, 2025. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.37>
4. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Найдьонова О. Є. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів території Харківського району Харківської області. Український журнал природничих наук, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.3>
5. Лялько В. І., Жолобак Г. М., Ходоровський А. Я. Космічний моніторинг довкілля як інструмент екологічної безпеки. Ukrainian Journal of Remote Sensing, 2019. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.20.145>
6. Онищук І. П., Кичирук О. Ю., Гаврилова А. М. Визначення вмісту іонів важких металів у ґрунтах, трансформованих у результаті вибухів. Український журнал природничих наук. 2025. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.36>
7. Палапа Н. В., Гончар С. М. Екологічні ризики, пов'язані із сільськогосподарською діяльністю людини. Агроекологічний журнал, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2022.255189>
8. Parakhnenko, V., Shemiakin, M., Vasylenko, O., Borovyk, P., & Honcharuk, V. (2026). Innovative ecological approaches to protecting natural and agroecosystems from the negative impact of invasive species. Journal Environmental Problems, 11(2), 158-168. <https://doi.org/10.23939/ep2026.02.158>

Дата першого надходження статті до видання: 15.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

НИЗЬКИЙ ВАГОВИЙ ВМІСТ КИСНЮ В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ЯК СКЛАДОВА РИЗИКУ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ В РЕГІОНАХ ЗАХІДНОЇ УКРАЇНИ

Грабко Н.В., Колісник А.В.

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

вул. Змієнка Всеволода, 2, 65082, м. Одеса

grabkonatalyavikt@gmail.com

Значна частина населення відчуває погіршення самопочуття та стану здоров'я, обумовлені коливаннями метеорологічних умов. Таке погіршення пов'язують із коливаннями вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі (P_o). Особливо це стосується низьких значень показника. У представленому дослідженні коливання P_o розглядаються як фактор ризику для здоров'я людини. А повторюваність порушень межі (нижньої) зони комфорту для P_o визначається як ймовірність небезпечного явища у визначенні поняття «ризик» (добуток частоти несприятливого явища і впливу). Метою дослідження стала оцінка частоти порушень зони комфорту P_o на 8 метеорологічних станціях Західної України, а також виділення найбільш і найменш комфортних для людини територій. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: оцінити і проаналізувати ситуацію щодо вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі в районі 8 метеостанцій з виявленням основних періодів порушення меж зони комфорту; оцінити роль висоти розташування станції над рівнем моря у формуванні значення P_o ; оцінити повторюваність порушень нижньої межі зони комфорту в районі кожної з досліджених метеостанцій; виявити станції з більш і менш комфортними значеннями повторюваності. За результатами дослідження було встановлено, що найбільш виражені порушення нижньої межі зони комфорту за P_o спостерігалися у літні місяці, висота станції над рівнем моря є визначальним фактором для рівня P_o , найбільший її вплив взимку, найменший – влітку; повторюваність порушень нижньої межі зони комфорту за P_o складає 17,6-51,9 % у різні роки на різних станціях, найбільші значення такої частоти (80-100 %) спостерігаються в літні місяці, найменші (близько 0) – у зимові; за результатами кластерного аналізу показано, що найбільш сприятлива ситуація спостерігається на метеостанціях Луцьк і Ужгород, найменш сприятлива – на станціях Тернопіль і Хмельницький. *Ключові слова:* ваговий вміст кисню в повітрі, ризик, здоров'я людини, частота, ймовірність, зона комфорту.

Low mass concentration of oxygen in atmospheric air as a risk for human health in the regions of Western Ukraine.
Hrabko N., Kolisnyk A.

A significant part of the population experiences a deterioration in well-being and health caused by fluctuations in meteorological conditions. Such deterioration is associated with fluctuations in the weight content of oxygen in the atmospheric air (P_o). This especially applies to low values of the indicator. In the presented study, fluctuations of P_o are considered as a risk factor for human health. And the repeatability of violations of the limit (lower) comfort zone for P_o is defined as the probability of a dangerous event in definition of "risk" (the product of the frequency of the adverse event and the impact). The purpose of the study was to assess the frequency of violations of the comfort zone of P_o at 8 meteorological stations in Western Ukraine, as well as to identify the most and least comfortable areas for humans. To achieve the goal, the following tasks were set: to evaluate and analyze the situation regarding the weight content of oxygen in atmospheric air in the area of 8 meteorological stations with the identification of the main periods of violation of the limits of the comfort zone; evaluate the role of station altitude in the formation of the P_o value; evaluate the repeatability of violations of the lower limit of the comfort zone in the area of each of the studied meteorological stations; identify meteorological stations with more and less comfortable repeatability values. According to the results of the study, it was established that the most pronounced violations of the lower limit of the comfort zone for P_o were observed in the summer months, the height of the station above sea level is a determining factor for the P_o level, its greatest influence is in winter, the smallest is in summer; the frequency of violations of the lower limit of the comfort zone according to P_o is 17.6-51.9% in different years at different stations, the highest values of this frequency (80-100%) are observed in the summer months, the lowest (about 0) in the winter months; according to the results of the cluster analysis, it is shown that the most favorable situation is observed at the Lutsk and Uzhhorod meteorological stations, the least favorable – at the Ternopil and Khmelnytskyi stations. *Key words:* mass concentration of oxygen in the air, risk, human health, frequency, probability, comfort zone.

Постановка проблеми. Вміст кисню в атмосферному повітрі вважається досить постійною величиною з середньою концентрацією 20,9 % [1]. Але на значення цього показника впливає висота населеного пункту над рівнем моря або зміни метеорологічних умов, що викликають коливання вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі. Це може стати причиною функціональних зрушень в організмі



людини, що супроводжується погіршенням самопочуття, виникненням головного болю, болів у м'язах або суглобах, втомлюваності, коливань артеріального тиску. Гіпоксичні ефекти, що супроводжують зниження вмісту кисню в повітрі, можуть проявлятися у збільшенні серцебиття й дихання, задишки, слабкості, запаморочення й сплутаності свідомості й інших хворобливих проявів [2]. Метеотропні реакції можуть демонструвати 35-40 % [2-3] населення, а серед хворих на хронічні хвороби цей показник може сягати 80 %. Це дослідження присвячено оцінці повторюваності (складової ризику) таких несприятливих метеорологічних умов в регіонах Західної України.

Актуальність дослідження обумовлена можливістю врахування періодів часу протягом року, особливо несприятливих для самопочуття або здоров'я людини, що досить важливо для регіонів Західної України, особливо у контексті розвитку рекреаційно-туристичної діяльності на цій території.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. З одного боку в науковій статті запропоновано підхід, що розвиває сучасні уявлення про екологічний ризик, і це можна вважати науковою складовою авторського доробку. З іншого – проведені дослідження мають безумовне практичне значення через безпосередній зв'язок із питаннями оцінки впливу екологічних умов на здоров'я людини. А результати досліджень можуть бути враховані під час планування заходів щодо розвитку рекреаційно-туристичної діяльності на території Західної України, що також має практичне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Переважна більшість сучасних публікацій, присвячених оцінці біокліматичних умов території присвячена оцінці й аналізу часового й територіального розповсюдження різноманітних біокліматичних індексів [4]. Дослідження, присвячені ваговому вмісту кисню в атмосферному повітрі зустрічаються досить часто [2-6] і розглядають, серед іншого, особливості його впливу на організм людини. Також існує достатня кількість публікацій, присвячених теоретичним і практичним питанням визначення екологічного ризику. Так, досить велику і розвернуту класифікацію ризиків надає Фаюра О.П. із співавт. [7]. А Войцицький В.М. [8] розглядає різноманітні підходи до визначення терміну «ризик», у тому числі, і як синонім термінів «вірогідність» і «частота». В.В. Добровольський [9], цитуючи М.Ф. Реймерса, також розглядає ризик як «вірогідність несприятливих для екологічних ресурсів наслідків». Згідно із Методичними рекомендаціями для здійснення оцінки ризиків [10] «ризик часто представляють як ймовірність або вірогідність виникнення небезпечних подій або тенденцій, помножену на вплив, якщо ці події або тенденції відбудуться» – так можна представити двокомпонентний підхід до визначення

ризик, широко поширений у публікаціях як вітчизняних, так і зарубіжних авторів. Також, з цього питання існує досить велика кількість різноманітної навчальної літератури, у тому числі [11]. Виходячи з цього, частоту несприятливих біокліматичних умов можна розглядати як вірогідність несприятливих наслідків для стану організму і здоров'я людини. І, застосувавши величину «впливу» цих несприятливих умов, можна визначити ризик. Саме визначенню першої складової ризику присвячено це дослідження. Крім того, в значній частині наукових публікацій з питань ризику застосовуються різноманітні статистичні методи. У представленому дослідженні крім загальновідомих статистичних методик застосовується кластерний аналіз, теоретичні і практичні основи якого добре показані у публікаціях А.Т. Ярового [12].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена означена стаття. У дослідженні вперше проведено порівняльний аналіз статистичних характеристик несприятливих біокліматичних умов (на прикладі вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі) у різних регіонах Західної України. Такі несприятливі умови розглядаються як один з факторів ризику (частота) впливу на організм людини. Також проводиться обговорення причин, що обумовлюють виникнення цих ризиків.

Новизна дослідження полягає у підході авторів до визначення повторюваності (частоти) випадків порушення нижньої межі оптимального діапазону вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі як складової ризику здоров'ю людини від несприятливих біокліматичних умов.

Методичне або загально наукове значення. У дослідженні у якості вихідних даних застосовувалися результати метеорологічних спостережень за температурою повітря, атмосферним тиском і відотною вологістю, що проводилися у стандартні строки спостережень – 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18 і 21 години. Використані відповідні матеріали з метеорологічних станцій обласних центрів Західної України (І.-Франківськ, Львів, Ужгород, Чернівці, Луцьк, Рівне, Тернопіль, Хмельницький – враховувалися тільки ті з них, що розташовані в обласних центрах) за кожен день 2020-2025 років.

Під ваговим вмістом кисню в атмосферному повітрі розуміють масу кисню в кубічному метрі атмосферного повітря. Визначення вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі здійснювалося за допомогою формули Клапейрона, застосування якої запропонувала В.Ф. Овчарова (вимірювання вмісту кисню в атмосферному повітрі здійснюється лише на декількох десятках станцій у світі, жодна з яких не розташована в Україні). Вигляд формули Клапейрона у різних публікаціях [2-7] трохи відрізняється. У цьому дослідженні вона була застосована у такому вигляді [2-5]:

$$P_o = 0,232m \frac{(P - e)}{KT}, \quad (1)$$

де P_o – ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі, г/м³;

0,232 – масова доля кисню в сухому повітрі;

m – молярна маса повітря (за m приймається 28,98 г/моль – це середня молярна маса сухого повітря);

P – атмосферний тиск, Па;

e – парціальний тиск водяної пари в атмосферному повітрі, Па;

K – молярна газова стала, Дж/(моль К) (K дорівнює 8,31 Дж/(моль К));

T – абсолютна температура повітря, К (T визначається як $273,15^\circ\text{C} + t^\circ$, де t° – температура атмосферного повітря).

Для визначення парціального тиску водяної пари (e) застосовують формули Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, запропоновані Всесвітньою метеорологічною організацією, із застосуванням відповідних значень температури повітря і відносної вологості.

Діапазон комфортних умов для показника P_o складає 280-300 г/м³ [2; 3], а інколи такий діапазон розширюється до 275-300 г/м³ [3]. Значення, отримані за допомогою формули (1), вважаються досить близькими до результатів фактичних вимірювань.

У дослідженні розраховувалися строкові значення вагового вмісту кисню. Кількість строкових значень P_o , розрахованих на кожній метеостанції за кожен рік показана в табл. 1. Різниця у кількості вимірювань на різних станціях протягом одного року пояснюється відсутністю вихідних даних у окремі строки через технічні причини. Дуже велика кількість таких «пропусків» спостерігалася у 2022 році – у зв'язку із бойовими діями.

На основі строкових значень розраховувалися середньомісячні значення P_o за кожен календарний місяць кожного з 2020-2025 років на кожній з 8 метеостанцій окремо. Також, визначалася повторюваність випадків порушення нижньої межі інтервалу

зони комфорту для вагового вмісту кисню в повітрі (275 г/м³) – щомісячна на кожній метеостанції за кожен з 6 досліджуваних років, а також за кожен місяць протягом всього шестирічного періоду.

Для визначення зв'язків між показниками вмісту кисню в повітрі і факторами, що впливають на нього, застосовувався кореляційний аналіз (розраховувався парний коефіцієнт кореляції Пірсона і коефіцієнт детермінації). А для візуального представлення результатів досліджень застосовувався графічний метод.

Щодо методичного аспекту дослідження, то можна додати, що це дослідження базується на уявленні про те, що «ризик часто представляють як ймовірність або вірогідність виникнення небезпечних подій або тенденцій, помножену на вплив, якщо ці події або тенденції відбудуться» [8]. У представленому дослідженні визначається частота (вірогідність) порушень нижньої межі зони комфорту для P_o – тобто одна зі складових ризику для самопочуття і здоров'я людини, обумовлена зниженням вмісту кисню в атмосферному повітрі. Характеристика «впливу» (друга складова «ризик») ще вимагатиме уточнення.

Викладення основного матеріалу.

На основі вихідних даних – значення температури атмосферного повітря, атмосферного тиску і парціальний тиск водяної пари (показник перерахований за стандартними формулами із застосуванням температури атмосферного повітря і відносної вологості – за формулою (1) були розраховані значення P_o за кожен строк спостережень (за виключенням тих строків, коли спостереження не здійснювалися). На основі цих даних для кожної з восьми метеорологічних станцій Західної України розраховувалися середньомісячні значення P_o за кожен місяць кожного року – з 2020 по 2025. Результати цих розрахунків представлені у вигляді графіків на рис. 1 і рис. 2.

Червоною пунктирною лінією на цих графіках показана нижня межа зони комфорту (275 г/м³). Верхню межу зони комфорту (300 г/м³) на графіки не нанесено, оскільки середньомісячні значення не перевищували цей показник на жодній з метеостанцій.

Таблиця 1

Кількість розрахованих значень P_o за кожен рік на восьми метеостанціях Західної України

Метеостанція	Рік						
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	Разом
І. Франківськ	2927	2919	2236	2901	2925	2920	16828
Львів	2921	2919	2234	2902	2925	2920	16821
Ужгород	2928	2920	883	2919	2928	2920	15498
Чернівці	2928	2920	2176	2919	2928	2920	16791
Луцьк	2927	2918	1727	2584	2823	2791	15770
Рівне	2926	2920	2355	2906	2925	2920	16952
Тернопіль	2926	2918	2334	2906	2926	2920	16930
Хмельницький	2928	2919	2350	2907	2926	2920	16950

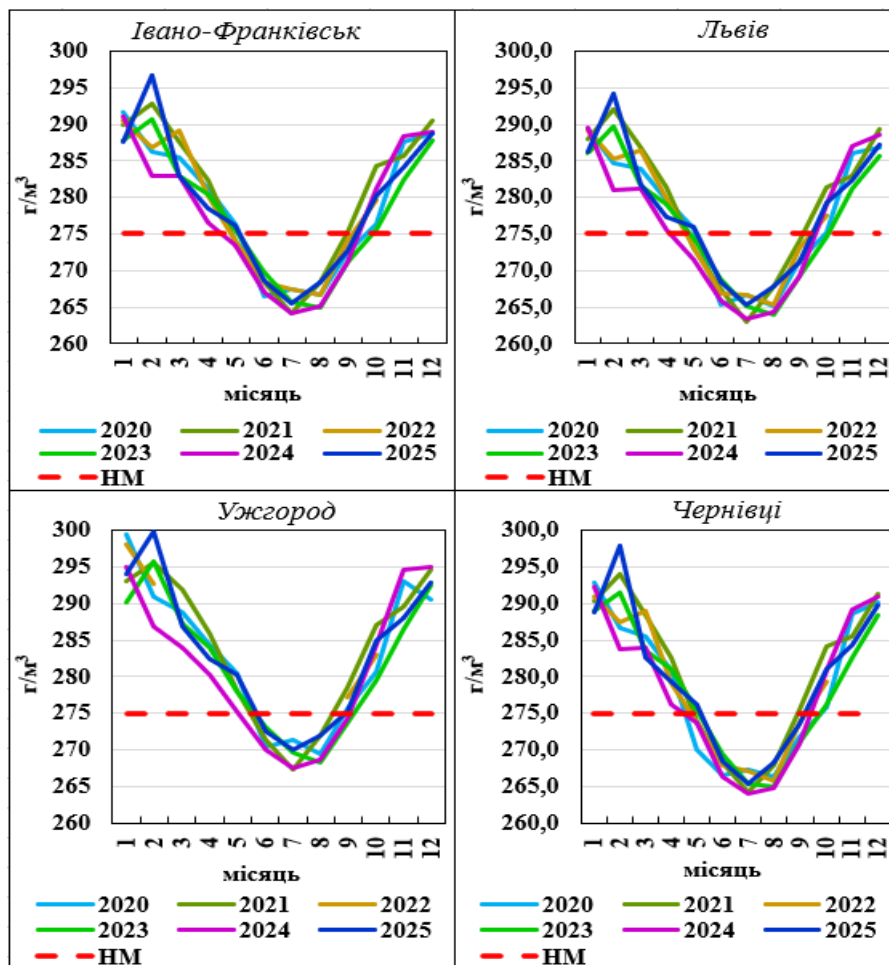


Рис. 1. Значення середньомісячних значень вагового вмісту кисню в повітрі на станціях І. Франківськ, Львів, Ужгород і Чернівці протягом 2020-2025 років

На цих рисунках можна побачити, що на кожній з восьми досліджених метеорологічних станцій порушення нижньої межі зони комфорту починається у травні і закінчується у вересні, а найбільш несприятливими з цієї точки зору є три літні місяці. Найбільш вираженими такі порушення є на метеостанціях Львів, Тернопіль і Хмельницький, а найменш – на станціях Луцьк і Ужгород.

Отже, зниження вагового вмісту кисню в атмосферному повітрі пов'язане з підвищенням температури атмосферного повітря у літній період року.

Така різниця пояснюється досить відомим фактором – висотою розташування метеостанції над рівнем моря. Коефіцієнт кореляції Пірсона, розрахований для 18 метеорологічних станцій, розташованих на території Західної України, і значеннями P_o , розрахованими для цих станцій за середніми багаторічними даними, складає 0,997, тобто зв'язок майже прямий. Для фактичних даних цей фактор також є визначальним, проте не єдиним.

На рис. 3 представлені регресійні графіки з коефіцієнтами детермінації між висотою станції над рівнем моря і середніми значеннями P_o , розра-

хованими на кожній з восьми станцій за період 2020-2025 років для середніх місяців кожного сезону року. Найтісніший (зворотний) зв'язок спостерігається у січні і характеризується коефіцієнтом кореляції Пірсона -0,989, найменший – у липні – і складає -0,896. У квітні і жовтні ці значення проміжні і складають відповідно -0,921 і -0,978. Такі результати показують, що саме в теплий період року місцеві умови вносять найбільший внесок у відхилення P_o від багаторічної норми.

Далі слід звернутися до ризику, обумовленого впливом на здоров'я людини зниженого P_o . «Ймовірністю небезпечної події» у цьому випадку буде частота порушень нижньої межі зони комфорту P_o (застосовувалося значення 275 г/м³). Результати визначення цього показника для восьми метеорологічних станцій Західної України за кожен з шістьох років дослідженого періоду представлена у табл. 2. З цієї таблиці вилучені дані на метеостанції Ужгород у 2022 році, оскільки через недостатню вибірку (можна побачити в табл. 1), отримана частота перетворилася у очевидний «викид».

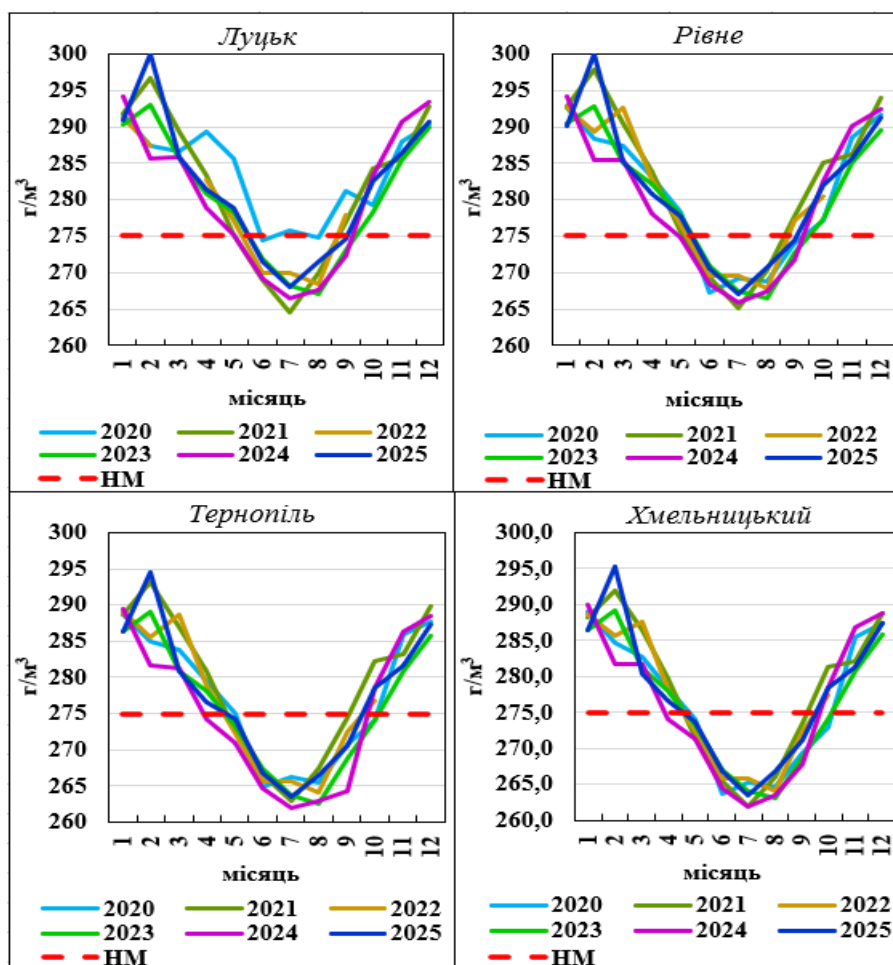


Рис. 2. Значення середньомісячних значень вагового вмісту кисню в повітрі на станціях Луцьк, Рівне, Тернопіль і Хмельницький протягом 2020-2025 років

З табл. 2 видно, що протягом року частота несприятливих умов, коли ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі нижчий за 275 г/м^3 , коливається дуже істотно – від 17,6 % (метеостанція Луцьк, 2020 рік) до 51,9 % (станція Хмельницький, 2022 рік). В середньому за 6 років дослідженого періоду найнижча частота порушень нижньої межі зони комфорту P_o спостерігалася в районі метеостанції Ужгород – 28,9 %, а найвища на метеостанції Хмельницький – 46,2 %.

Важливим є показник частоти порушень комфортних умов за P_o протягом різних місяців року. На рис. 4 представлені значення показника P_o , осереднені для кожного місяця року за період 2020-2025 років. На рис. 4 можна побачити, що саме у літні місяці частота порушень зони комфорту за P_o складає 80-100 %. У інші місяці (за виключенням травня і вересня) цей показник не перевищує 40 %. Отже, найнесприятливішими місяцями за цим показником знову стали літні.

Для визначення схожості ситуації на різних метеостанціях протягом літнього сезону був проведений кластерний аналіз вісьмох метеостанцій, що при-

йняли участь у дослідженні, за частотою порушень нижньої межі зони комфорту P_o у кожен з літніх місяців (червень, липень і серпень).

Застосовувався метод деревоподібної кластеризації з розрахунком Евклідових відстаней. Результати кластеризації представлені на рис. 5.

Аналіз цього рисунку показав, що умовно можна виділити такі групи (кластери) метеостанцій:

Перший кластер – це Луцьк і Ужгород з найнижчою частотою порушень у червні-вересні (характеризуються найнижчою – Ужгород і однією з найнижчих – Луцьк висотою розташування над рівнем моря).

Другий кластер – це метеостанція Рівне зі середньою частотою порушень показника, що характеризується низькою (друга за значенням) висотою над рівнем моря.

Третій кластер – це метеостанції І.-Франківськ, Львів, Чернівці, Тернопіль і Хмельницький. Вони характеризуються найбільшою частотою порушень нижньої межі зони комфорту P_o у літні місяці і, одночасно, найвищою висотою розташування над рівнем моря.

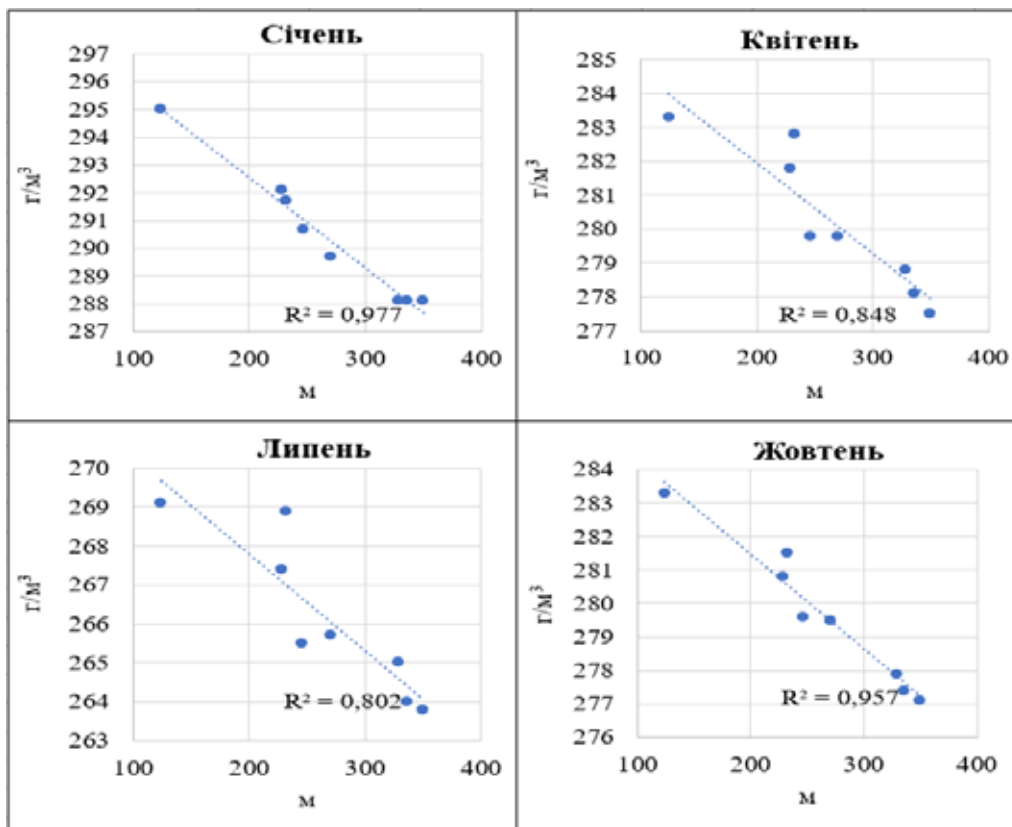


Рис. 3. Коефіцієнти детермінації між висотою станції над рівнем моря і середнім по станції P_o за період 2020-2025 років у центральні місяці сезонів року

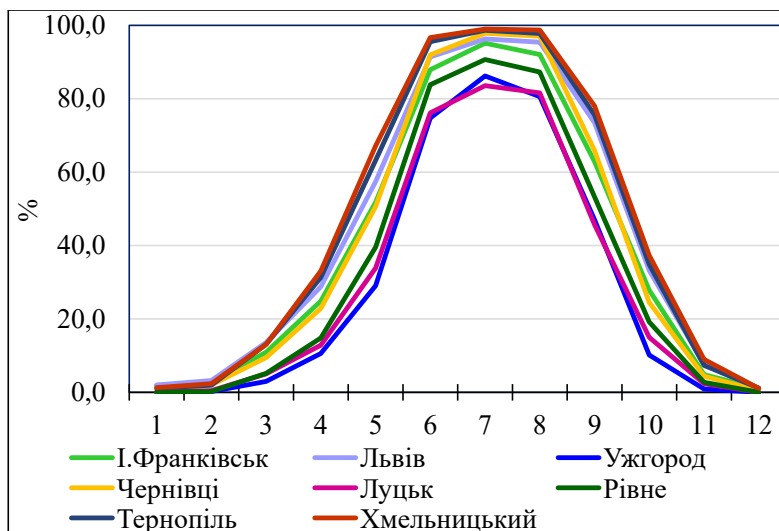


Рис. 4. Графік річного ходу значень P_o , осереднених за період 2020-2025 років

Отримані результати вказують на те, що в регіонах Західної України навіть у літні місяці, найменш сприятливі з точки зору порушення межі комфортних біокліматичних умов, можна спостерігати певні територіальні особливості: у Луцьку і в Ужгороді умови влітку будуть більш сприятливі, а у Тернополі і в Хмельницькому – менш.

Головні висновки.

Ваговий вміст кисню в атмосферному повітрі слід вважати одним з важливіших біокліматичних показників, що характеризують ризик несприятливого впливу зовнішнього середовища на здоров'я людини.

Несприятливі біокліматичні умови за показником P_o в регіонах Західної України полягають переважно

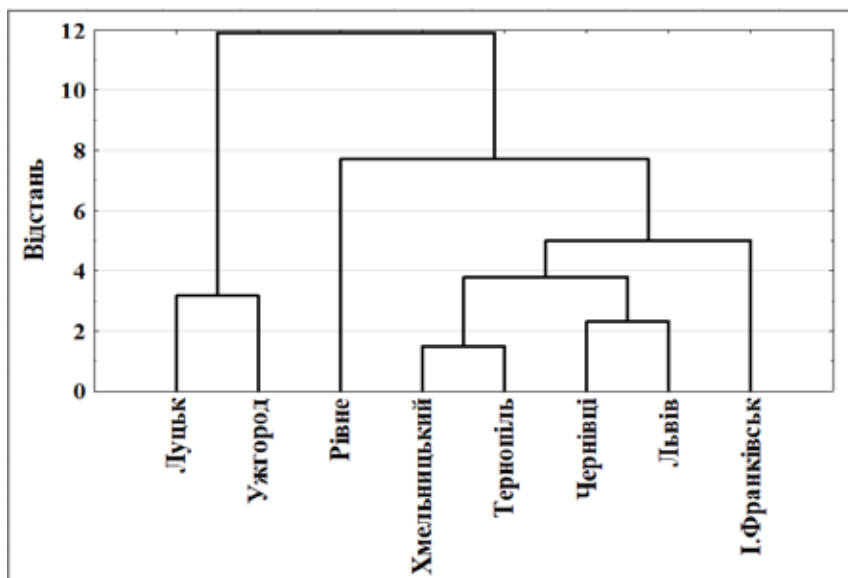


Рис. 5. Результати кластеризації метеостанцій Західної України за частотою порушень нижньої межі зони комфорту P_o у червні, липні і серпні

Таблиця 2

Результати розрахунків частоти порушень нижньої межі зони комфорту P_o за роками, %

Метеостанція	Рік						Середнє
	2020	2021	2022	2023	2024	2025	
І. Франківськ	38,7	34,7	47,0	42,4	42,3	36,9	40,3
Львів	41,1	37,3	50,8	46,3	47,0	39,4	43,7
Ужгород	28,2	24,3		31,6	33,9	26,6	28,9
Чернівці	38,8	34,6	49,6	43,0	43,1	36,3	40,9
Луцьк	17,6	30,6	43,8	37,3	37,3	30,6	32,9
Рівне	33,7	29,4	36,2	36,5	37,9	31,5	34,2
Тернопіль	42,1	37,6	51,7	48,5	48,0	42,4	45,1
Хмельницький	46,1	40,0	51,9	48,5	47,7	43,2	46,2

із порушеннями нижньої межі зони комфорту, а не верхньої. Найбільш виражені порушення такого критерія спостерігаються в районі метеостанцій Львів, Тернопіль і Хмельницький, найменш виражені – на метеостанціях Луцьк і Ужгород.

Основним фактором, що визначає P_o є висота розташування метеостанції над рівнем моря. Найбільш тісним такий зв'язок є взимку, найменш – літку. Восени він більш тісний, ніж весною.

Повторюваність порушень нижньої межі зони комфортних значень за показником P_o в різних регіонах знаходиться у діапазоні 17,6-51,9 % у різні роки. Повторюваність таких порушень в районі кожної з 8 досліджених станцій Західної України найбільш висока у літні місяці року і складає 80-100 %, найнижча – взимку і наближається до нуля.

Кластеризація метеорологічних станцій Західної України за повторюваністю нижньої межі зони комфорту P_o у червні, липні і серпні (на основі даних, осереднених за 2020-2025 роки) показала, що найбільш сприятливі умови спостерігалися на станціях Луцьк і Ужгород, а найменш сприятливі – на станціях Тернопіль і Хмельницький. Ці висновки дуже близькі до ситуації щодо порушення нижньої межі зони комфорту за фактичними значеннями P_o .

Перспективи використання результатів досліджень.

Отримані результати є попередніми і вимагають більш детальної обробки та вивчення, що і планується здійснити у подальших дослідженнях з цієї тематики.

Література

1. Сафранов Т.А. Екологічні основи природокористування: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Львів: «Новий Світ-2000», 2003. 248 с.
2. Грабко Н.В. Демографічний аспект екологічної ситуації в регіонах Західної України. *Євроінтеграція екологічної політики України: Матеріали Сьомої Всеукраїнської науково-практичної конференції* (Одеса, 3-5 листопада 2025 р.). Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2025. С. 185-189.
3. Грабко Н.В. Вплив несприятливих біокліматичних умов на здоров'я людини (на прикладі м. Львів). *Матеріали до 80-ої звітної наукової конференції професорсько викладацького складу і наукових працівників ОНУ імені І. І. Мечникова. Секція «Гідрометеорологія і екологія»* (Одеса, 26–28 лист. 2025 р.). Одеса: Одес. нац. ун-т ім. І.І. Мечникова, 2025. С. 141-145.
4. Данова Т.С., Катеруша Г.П. Аспекти екологічної кліматології: Навчальний посібник. Одеса: ТЕС, 2015. 184 с.
5. Грабко Н.В., Колісник А.В. Попередня оцінка ролі певних метеорологічних і біометеорологічних умов у формуванні смертності від COVID-19 в Одеській області. *Екологічні науки*. 2024. № 1(52), Том 2. С. 129-134. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.24>
6. Грабко Н.В., Колісник А.В. Екологічні фактори впливу на смертність населення Одеської області. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2024. № 33. С. 115-124. <https://doi.org/10.31481/uhmj.33.2024.10>
7. Чинники ризику: методика визначення й оцінювання, прогнозування в медицині (огляд літератури; приклади використання у власній клінічній практиці) – повідомлення перше / Фаюра О.П., Максимук А.О., Абрагамович О.О. та ін. *Lviv Clinical Bulletin*. 2021. 1(33) – 2(34). С. 59-64. URL: <https://doi.org/10.25040/lkv2021.01-02.051>
8. Екологічні ризики: природа і критерії / Войціцький В.М., Хижняк С.В., Данчук В.В. та ін. *Екологічні науки*. 2020. № 4(31). С. 131-135. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.21>
9. Добровольський В.В. Екологічний ризик: причинно-наслідкові зв'язки в екосистемі. *Екологія. Наукові праці*. 2010. Том 132. Вип. 119. С. 6-9. URL: <http://ecology.chdu.edu.ua/article/view/64566>
10. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату / Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. 2023. № 386. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text>
11. Бредун В.І. Екологічна безпека та управління ризиками. Навчальний посібник. Полтава: Видання Національного університету імені Юрія Кондратюка, 2021. 189 с. URL: <https://reposit.nupr.edu.ua/files/original/23/17418/c9fa36e6ae5951d254ee5bfa05310c08afb95865.pdf>
12. Яровий А. Т., Страхов Є. М. Багатовимірний статистичний аналіз: начально-методичний посібник для студентів математичних та економічних фахів. Одеса: Астропринт, 2015. 132 с. URL: <https://files.znu.edu.ua/files/Bibliobooks/Inshi75/0056336.pdf>

Дата першого надходження статті до видання: 25.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕНЬ ҐРУНТОВОГО ПОКРИВУ ТА РОЗВИТКУ ЕРОЗІЇ ҐРУНТУ ВЕЛИКОПИСАРІВСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Бережняк Є.М., Богданець В.А., Бровко Д.Ю.

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

beregnyakem@nubip.edu.ua, v_bogdanets@nubip.edu.ua, brovko.d@nubip.edu.ua

Прикордонні райони Сумської області, зокрема територіальна громада Великої Писарівки, зазнають безпрецедентних механічних та екологічних порушень ґрунтового покриву через посилення бойових дій та постійні обстріли. Це дослідження зосереджено на оцінці ступеня деградації ґрунту та прискореного розвитку ерозійних процесів внаслідок військових дій.

Методологія дослідження інтегрує геоінформаційні системи з відкритим кодом (QGIS) з багаточасовими супутниковими знімками Sentinel-2 (рівень 2A) та Planet Labs Super Dove (рівень 3B). Ці джерела даних, із високою роздільною здатністю, дозволили візуально виявити й кількісно оцінити порушення ґрунту в сільськогосподарських і природних ландшафтах. За інтенсивністю обстрілів пік вибухів припав на березень 2024 року, коли було зареєстровано 2653 випадки у досліджуваній зоні. Зазначається, що методами дистанційного моніторингу важко ідентифікувати кратери від мінометів (діаметром близько 1 м), які суттєво порушують цілісність ландшафтів. За аналізом часових рядів задокументовано різке прискорення ерозії ярів, що пов'язано із військовим впливом по причині залишення сільськогосподарських угідь. Встановлено, що на одній репрезентативній ділянці лінійний прояв яру розширився із 300 до 800 м, що становить збільшення довжини на 166%, протягом одного періоду спостереження. Це зростання пояснюється комбінованим впливом знищення рослинності та механічного руйнування верхнього шару ґрунту вибухами. Результати досліджень підкреслюють нагальну потребу в постійному дистанційному моніторингу для оцінки втрати родючих земель та планування майбутніх стратегій рекультивації пошкоджених війною агроландшафтів. *Ключові слова:* бойові дії, вибухи, порушення цілісності ландшафту, ерозія ґрунту, супутникові знімки Sentinel-2, Planet Labs Super Dove, QGIS.

Detection of disturbances of the soil cover and soil erosion development of the Velyka Pysarivka territorial community of Sumy region as a result of military actions. Berezhniak Ye., Bogdanets V., Brovko D.

The border regions of the Sumy region, particularly the Velyka Pysarivka territorial community, are experiencing unprecedented mechanical and ecological disturbances to the soil cover due to intensified hostilities and constant shelling. This study focuses on assessing the extent of soil degradation and the accelerated development of erosion processes resulting from military actions. The research methodology integrates open-source geoinformation systems (QGIS) with multitemporal satellite imagery from Sentinel-2 (Level-2A) and Planet Labs Super Dove (Level-3B) sensors. These high-resolution data sources enabled the visual detection and quantification of soil disturbances across agricultural and natural landscapes. Analysis of shelling intensity revealed a critical peak in March 2024, with 2,653 recorded explosion cases within the study area. The research highlights a specific challenge in remote monitoring, noting that while mortar-induced craters (approx. 1 m diameter) are difficult to identify via satellite, they cause widespread superficial damage to the soil structure. Meanwhile, time-series analysis documented a dramatic acceleration in gully erosion directly linked to military impacts due to agricultural land abandonment. In one representative site, the linear manifestation of a gully expanded from 300 meters to 800 meters, representing a 166% increase in length within a single observation period. This growth is attributed to the combined effect of vegetation destruction and the mechanical shattering of the soil's top layer by explosions. The findings underscore the urgent need for continuous remote monitoring to estimate the loss of fertile land and plan future reclamation strategies for war-damaged agricultural landscapes. *Key words:* hostilities, explosions, disturbance of landscape integrity, soil erosion, Sentinel-2 satellite images, Planet Labs Super Dove, QGIS.

Актуальність дослідження.

Повномасштабне вторгнення рф в Україну триває вже понад 4 роки. За цей період у багатьох регіонах України було завдано значної шкоди природним ресурсам, зокрема у Сумській області. Зокрема,

прикордонні регіони України дедалі більше зазнають інтенсивного впливу через військові дії, відбуваються значні порушення агро- і природних ландшафтів, деградації ґрунтових ресурсів. У Сумській області безперервні обстріли, вибухи і розгортання



важкої військової техніки порушують цілісність ґрунтового покриву, прискорюють процеси ерозії, знижують продуктивність та екологічну стабільність сільськогосподарських угідь. Такі трансформації не лише загрожують місцевим екосистемам, але й створюють довгострокові виклики для відновлення земель, сталого сільського господарства та регіональної екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вплив війни на ґрунт та інші природні ресурси вивчали багато вчених. Зокрема, М. Ismayilov та ін. [1] досліджували вплив військових конфліктів на трансформацію ландшафтів на прикладі Агдамського району Азербайджану. Їхнє дослідження продемонструвало, що збройні дії значно змінили форми рельєфу та порушили природні ландшафтні структури, що підкреслило війну як головну рушійну силу довгострокових змін навколишнього середовища. Broomandi et al [2] представили критичний огляд забруднення ґрунту в районах, що постраждали від військової діяльності. Автори стверджують, що війна сприяла серйозному забрудненню ґрунту важкими металами, залишками вибухових речовин та іншими токсичними сполуками, що створює загрозу для повноцінного розвитку екосистем та безпеки людей. Незважаючи на важливий синтез шляхів забруднення, дослідження залишалося значною мірою теоретичним і не розглядало практичну ідентифікацію та просторове картографування порушень ґрунту, спричинених війною, а саме у реальних бойових умовах, особливо в прикордонних регіонах, де тривають бойові дії.

Фактично, те, що зараз відбувається в регіоні, можна охарактеризувати як екоцид, тобто цілеспрямоване знищення природних ресурсів, масове руйнування екосистем, що зрештою призводить до незворотних довгострокових наслідків для всього живого [3]. В огляді роботи [4] показано, що масштабні обстріли в Сумській області у 2024 році завдали шкоди не лише домовласникам та місцевій інфраструктурі, а й спричинили порушення на сільськогосподарських угіддях. Тому розуміння та оцінка масштабів порушень ґрунту, спричинених війною, стало важливим науковим і практичним завданням для забезпечення ефективного постконфліктного відновлення та відповідального планування землекористування.

У статті А. Гончарової та ін. [5] наведено ґрунтовний аналіз новітніх досліджень та публікацій науковців, представлених у базі даних Web of Science (WoS), які стосуються впливу військових операцій на стан ґрунтів та сільськогосподарських угідь. Автори вказують, що кількість наукових робіт у цій галузі відносно невелика, порівняно з іншими галузями екологічних та сільськогосподарських досліджень. Так, починаючи із 2022 року кількість статей зростає, причиною цього є російсько-українська війна, де багато українських вчених почали досліджувати

вплив війни на природні ресурси, особливо на ґрунтовий покрив і вивчати відповідні порушення ґрунту. Також військові дії призвели до значної деградації ґрунтів, порушення агроєкосистем та втрати продуктивності сільськогосподарських угідь.

За даними Сумської державної адміністрації [6], впродовж воєнних років в області посівні площі скоротилися із 1,21 млн га до 1,025 млн га, тобто на 15%, головним чином за рахунок обмежень території прикордонних громад. Наприклад, у 2021 році загальний збір зернових та зернобобових культур склав 4 260,8 тис. т., а у 2024 році – лише 3 178,8 тис. т. [7]. Тому ця проблема є актуальною, особливо з точки зору реалізації планів щодо продовольчої безпеки держави [8, 9].

В. Пересадько та ін. [10] пропонують, враховуючи сучасну ситуацію в Україні, використовувати термін «військові ландшафти», маючи на увазі ландшафти, які безпосередньо постраждали від військових дій: мінування, обстрілів, бомбардувань, тощо. Автори наголошують, що наразі немає сучасних карт військових ландшафтів, як для кожної окремої території України. У цьому випадку автори дистанційно вивчали картографічні матеріали, взяті з відкритих джерел, за якими можна визначити території, що потребують ландшафтного відновлення.

У статті Y. Ma, et al. [11] наведено ретроспективний аналіз покинутих сільськогосподарських угідь у довоєнний період та впродовж війни. У цьому випадку також були проаналізовані дані супутникового дистанційного зондування. Так, у західній Херсонській та центральній частині Луганська, де вже тривалий час відбуваються військові дії, були виявлені гарячі точки покинутих війною орних угідь. Сумська область не є винятком.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на те, що загальний вплив військових дій на довкілля постійно документується, бракує кількісних даних щодо процесів розвитку яружної ерозії, спричиненої високоінтенсивними обстрілами в прикордонних районах. Таким чином, розвиток процесів деградації ґрунту в умовах активних військових дій потребує подальшого вивчення. Звідси слідує, що тема різноманітних порушень ґрунтового покриву є актуальною, сучасною та потребує висвітлення у наукових публікаціях, що ми й зробили у статті.

Наукова новизна дослідження полягає в комплексному використанні мультиспектральних даних Sentinel-2 та знімків Planet Labs Super Dove у поєднанні із статистичними даними та задокументованими пошкодженнями ґрунтів, що дозволяє виявляти порушення ґрунтів, які раніше були невластивими для стандартного екологічного моніторингу.

Метою дослідження було виявлення порушень ґрунтового покриву та розвитку яружної ерозії у Великописарівській територіальній громаді

Сумської області внаслідок бойових дій на основі звітних матеріалів Сумського обласного військового управління та шляхом аналізу різночасових космічних знімків.

Методологічне та наукове значення. У роботі використовувалися дані дистанційного зондування з відкритих джерел, зокрема з *Copernicus Hub*, включаючи матеріали космічного апарату *Sentinel-2* та Супутникові знімки *Super Dove* (© Planet Labs PBC) [12], які дозволили нам оцінити видимі порушення ґрунтового покриву на прикладі територіальної громади Велика Писарівка, яка належить до прикордонних регіонів і постійно зазнає впливу бойових дій. Вибір громади цілком очевидний, оскільки вона є однією з найбільш постраждалих [13]. Конкретні зображення були відібрані з урахуванням хмарності та пори року (місяця) – липня і серпня. Аналіз враховував п'ятирічний період знімків, із 2021 до 2025 років. У статті також представлені дані, взяті з архівів Сумської обласної військової адміністрації (ОВА) щодо динаміки вибухів від різних типів вогнепальної зброї в досліджуваній громаді.

Відзначаємо, що як основні дані дистанційного зондування використано продукт *Sentinel-2* (Level-2A). *Super Dove* – це супутники останнього покоління сузір'я PlanetScore. *Super Dove* (PSB.SD) має значну перевагу, оскільки ці супутники мають 8 спектральних каналів, що значно розширює можливості аналізу, порівняно зі старими поколіннями *Dove* (4 канали). На відміну від стандартних сис-

тем RGB-NIR, *Super Dove* має канали, сумісні із спектральними діапазонами *Sentinel-2*, що дозволяє проводити перехресне калібрування. Просторова роздільна здатність (GSD): ~3,7–4,1 м (на висоті 475 км), але продукт постачається з передискретизацією до 3,0 м. Радіометрична роздільна здатність: 16 біт. Використовувався продукт рівня 3B (Analytic Surface Reflectance). Використання каналів PSB SD Red Edge та NIR дозволило точно ідентифікувати межі пошкоджених ділянок, які є осередками ініціювання ерозійних процесів. Для обробки геопросторових даних використовувалося програмне забезпечення QGIS v3.44. Для видобування контурів було використано офіційні адміністративні кордони у вигляді векторного файлу.

З міркувань безпеки досить складно потрапити в реальні польові умови з безпосереднім виїздом на поля та провести відповідні польові дослідження. Тому для виявлення видимих порушень ґрунтового покриву в регіоні було використано різночасові супутникові знімки (2021–2025), які знаходяться у відкритому доступі, з подальшим їх аналізом у програмному забезпеченні QGIS. Серед низки прикордонних регіонів Сумської області наше дослідження зосереджено на Великописарівській територіальній громаді, площа досліджуваної території в межах контуру, позначеного на карті, становить 491,93 км² (рис. 1).

Загальний вигляд досліджуваної території, яка була використана для визначення виявлених порушень ґрунтового покриву, показано на рисунку 2.

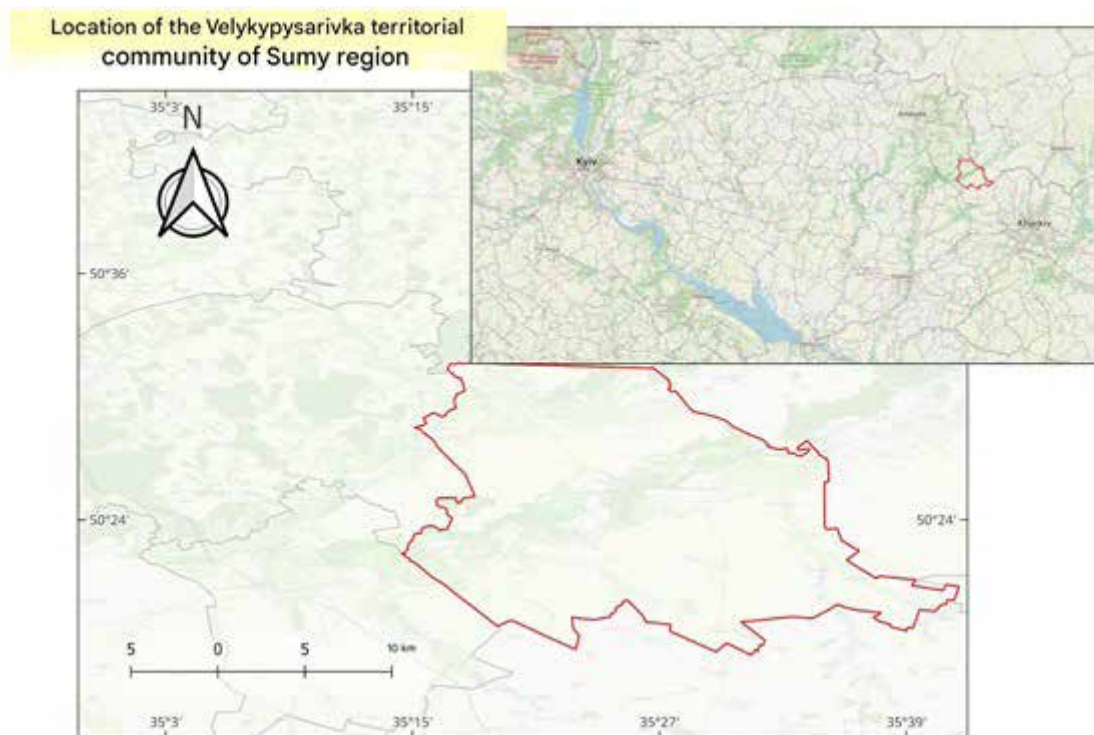


Рис. 1. Карта досліджуваної території Великописарівської громади Сумської області



Рис. 2. Супутниковий знімок території Великописарівської територіальної громади станом на 29 липня 2025 року.

Джерело : Візуальна комбінація смуг зображення Sentinel-2, отримана з сервісу ESA Copernicus

Статистичну інформацію про загальну кількість таких інцидентів у Великописарівській громаді отримано з офіційної сторінки Сумської обласної військової адміністрації. У межах досліджуваної громади, як зазначено на їхньому веб-сайті [13] розташовані такі населені пункти: село Велика Писарівка з населенням 5399 осіб, село Ямне з населенням 1640 осіб, село Добрянське з населенням 1039 осіб, село Попівка з населенням 1082 особи та інші з населенням менше 1000 осіб. Загальна чисельність населення громади становить 16072 особи. Адміністративний центр громади – село Велика Писарівка, яке розташоване на лівому березі річки Ворскла та знаходиться за 90 км від обласного центру міста Суми. У межах Великописарівської громади розташований Національний природний заповідник «Гетьманський».

Виклад основного матеріалу. З початку повномасштабного вторгнення в Україну прикордонні регіони дедалі більше зазнають інтенсивних військових операцій, які спричинили глибокі порушення природних ландшафтів та призвели до суттєвої деградації ґрунтових ресурсів. Агроландшафти щодня зазнають масованих артилерійських обстрілів, які руйнують поверхню ґрунту, утворюючи мережу воронок, приклад однієї з яких наведено нижче (рис. 3).

Американський інститут вивчення війни (ISW) [14] надає карту Сумської області, яка ілюструє просування російських військових та частково окуповану прикордонну територію станом на 29 травня 2025 року (рис. 4).

Після аналізу літературних джерел [15; 16] виявлено, що значний вплив на ґрунтовий покрив від-



Рис. 3. Вирви, що утворилися внаслідок вибухів снарядів у селі Шалигине, Сумська область, 11 червня 2022 року
Джерело: фото Сумської РДА

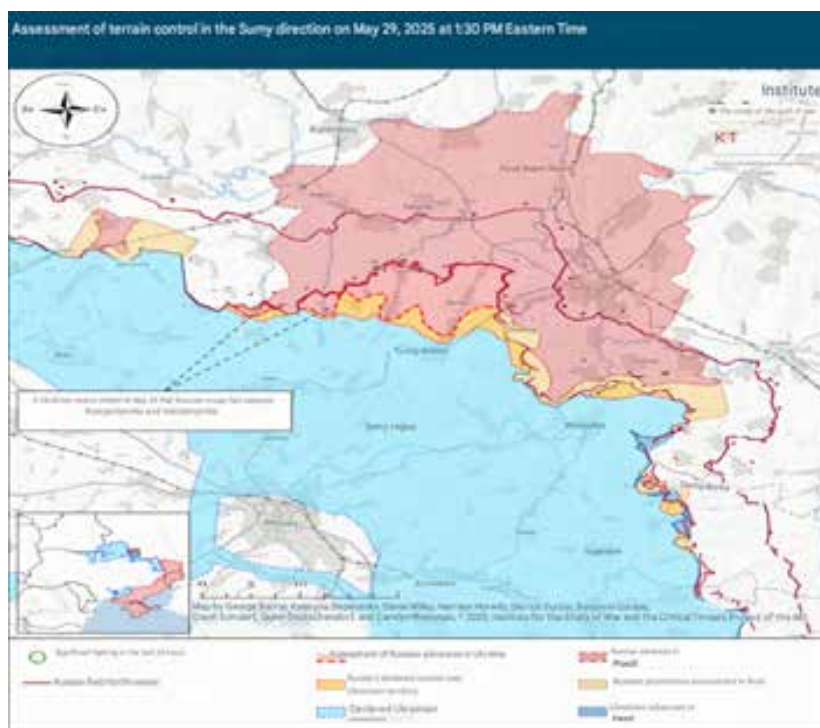


Рис. 4. Фрагмент карти території Сумської області станом на 29 травня 2025 року

Джерело : Інститут вивчення війни (ISW)

бувається саме через використання на полях битв різної вогнепальної зброї. Зокрема, при попаданні снарядів у ґрунт і рослинність утворюються видимі порушення – кратери, окопи, рови, плями від паливно-мастильних матеріалів, сліди пожеж тощо.

Станом на серпень 2024 року у Великописарівській громаді сталося 1004 вибухи з різних видів зброї, а саме: мінометів – 417, ствольної артилерії – 287, безпілотників FPV – 108, гранатометів – 56, некерованих авіаційних ракет – 17, керованих авіаційних бомб – 11 (рис. 5).

Загалом, динаміка кількості вибухів, спричинених різними видами зброї на території Великописарівської громади, представлена у таблиці 1.

Важко показати тенденцію збільшення/зменшення кількості вибухів на основі наявних даних (таблиця 1), оскільки їх кількість за місяць у населеному пункті неможливо передбачити. Значною мірою це залежить від інтенсивності агресії противника та конкретних завдань його командирів щодо здійснення відповідних штурмів територій. Було виявлено, що найбільша кількість вибухів у населеному пункті сталася у березні 2024 року – 2653, а найменша рівно через рік, у березні 2025 року – 538 випадків. Загалом спостерігається тенденція зменшення кількості вибухів мінометів на рік, а саме з березня 2024 року по квітень 2025 року. Однак ситуація постійно змінюється. Варто додати, що мінометні постріли при розриві 82-мм мін утворюють воронки діаметром понад 1 м та глибиною 50-60 см, а при розриві фугасних мін утворюються воронки діаме-

тром 3-4 м та глибиною близько 1 м. Такі негативні зміни на поверхні ґрунту важко побачити на супутникових знімках, але вони суттєво порушують цілісність ландшафту, формуючи мережу негативних рельєфних форм, зрушень ґрунту та забруднення в місцях потрапляння снарядів.

Варто зазначити, що згідно зі «Стратегією розвитку Великописарівської територіальної громади...» [17] у структурі земельного фонду Великописарівської сільської ради частка сільськогосподарських угідь становить майже 81,6% або 41 тис. 709 га, і такі землі вважаються екологічно нестабільними через постійне виснаження ґрунтів, їх можливе забруднення та розвиток деградаційних процесів [18]. Розораність земель громади становить майже 63%, а сільськогосподарських угідь – 77,2%, що свідчить про достатньо високий рівень інтенсивності землекористування. Частка лісів та інших вкритих лісом територій становить 9,8%, відкритих водно-болотних угідь (2,9%), водойм (1,1%), природоохоронних територій (1,4%).

Враховуючи високий рівень розораності території громади, під час вивчення матеріалів дистанційного зондування особлива увага приділялася тим негативним деградаційним процесам, які притаманні сільськогосподарським ландшафтам, наприклад, розвитку водної ерозії. Ознаки таких небажаних процесів легко розшифровуються за матеріалами дистанційного зондування високої просторової роздільної здатності (1-10 м). Фрагменти розвитку водної ерозії виявлені на сільськогосподарських угіддях громади (рис. 6).

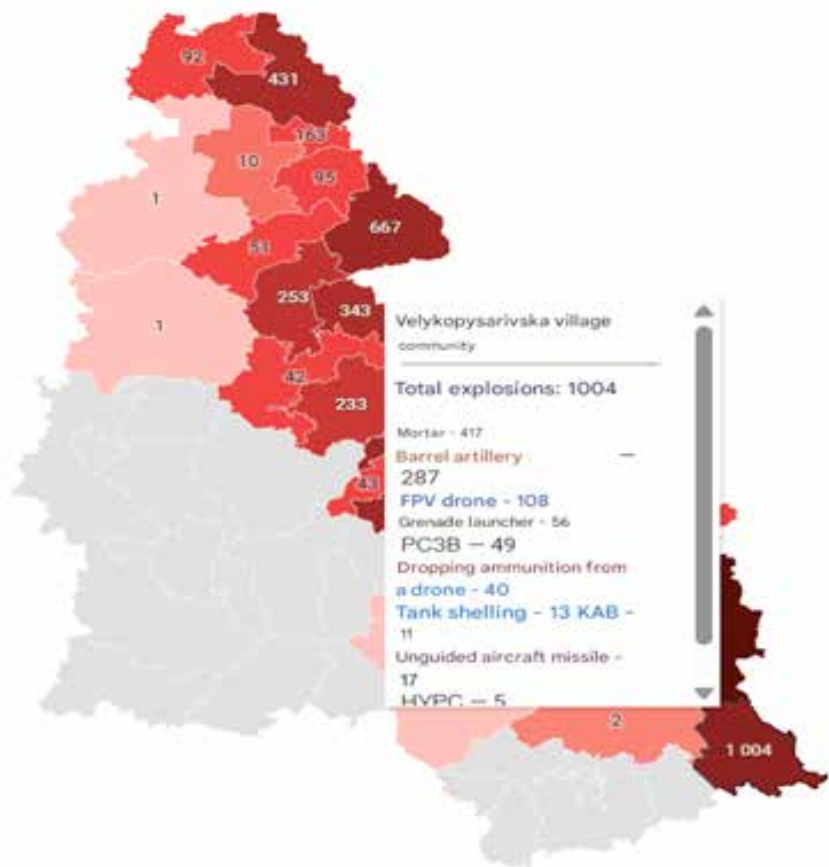


Рис. 5. Загальна кількість вибухів від різних видів зброї у Великописарівській територіальній громаді за серпень 2024 року

Джерело: дані Сумської обласної ради (2025)

Таблиця 1

Динаміка вибухів, спричинених різними видами вогнепальної зброї на території Великописарівської територіальній громаді у 2024-2025 роках
Джерело: узагальнені дані, взяті з інтерактивних карт Сумської обласної військової адміністрації (СОА), 2025

Види зброї	2024 рік		2025 рік			
	Березень	Серпень	Лютий	Березень	Квітень	Травень
Загальна кількість	2653	1004	1035	538	754	1210
Міномет	730	417	308	210	160	289
Керована авіаційна бомба (КАБ)	250	11		19	21	5
Авіаційна фугасна бомба	38					
Некерована авіаційна ракета (НАР)	319	22	79	19	21	5
Системи залпового вогню (РСЗВ)	601	49	11	9		2
Гранатомет	93	56	10	17		15
Ствольна артилерія	561	287	195	79	218	373
Обстріл з танків/БМП		13				20
FPV-дрони	35	108	199	127	217	
Скидання боєприпасів з дрона	18	40	231	56	135	190
БПЛА Шахед				1		
БПЛА "Ланцет"	4					4
БПЛА, тип не вказано			2	1	3	
Дрон-камікадзе				19		
Ракетний удар	4	1				



Рис. 6. Супутникове зображення фрагмента досліджуваної території станом на 29 липня 2025 року, де стрілками позначені ознаки ерозійних процесів

Примітка : внизу зображення зображено околиці села Велика Писарівка.
Джерело: розроблено авторами на основі Planet Labs PBC

Зображення часових рядів, отримані з космічного апарату SuperDove (©Planet Labs PBC) з просторовою роздільною здатністю 3 м (рис. 7), відстежують еволюцію ерозійних процесів на сільськогосподарських угіддях поблизу села Велика Писарівка. Як видно, зображення (комбінація каналів еквівалентна RGB видимого діапазону) демонструють розвиток ерозії ґрунту на досліджуваній території за період 2021-2025 років. Варто зазначити, що дата першого зображення (7a) – 27 липня 2021 року, другого (7b) – 5 серпня 2023 року, а третього (7c) – 31 серпня 2025 року. Вибрані дати зумовлені наявністю безхмарної погоди та необхідністю отримання порівнянних дат за той самий період у різні роки.

На основі ГІС-аналізу та лінійних вимірювань багаточасових супутникових знімків, часові ряди зображень виявляють розвиток ярової ерозії. Деякі її лінійні прояви досягають довжини від 300 до 800 метрів, що, згідно з нашими вимірюваннями на знімках, показує збільшення довжини на 166%. Довжина найбільшого яру на рис. 7a була виміряна як 800 м, тоді як на рис. 7в вона становить 2200 м, що становить збільшення на 175%. Однією з причин цього явища є значна кількість покинутих сільськогосподарських угідь та неможливість впровадження протиерозійних заходів через тривалий період

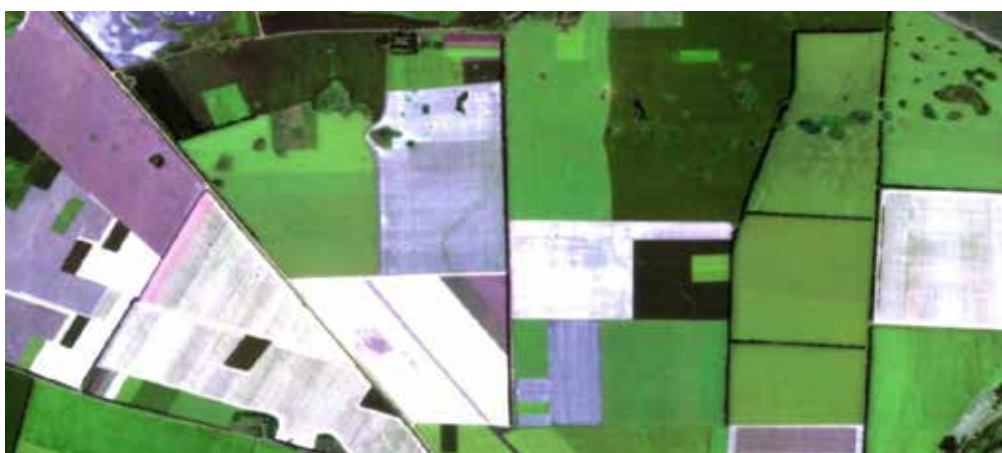
активних військових дій у регіоні. Натомість, продовження бойових дій лише прискорить формування лінійних форм її проявів, а відносна відкритість поверхні ґрунту сприятиме зростанню її обсягів. Оцінка масштабів поширення ерозійних процесів за допомогою матеріалів дистанційного зондування з визначенням їх особливостей прояву, кількісних та якісних характеристик буде серед завдань наших подальших досліджень.

Отже, досліджувана проблема є типовою для більшості східних регіонів України, які мають спільний кордон з Росією. Подібні дослідження в Харківській області проводили С. Балюк, А. Кучер та М. Ромащенко [19], які підготували наукову монографію після трьох років спостережень за порушеними військовими ділянками. У монографії оцінюється вплив військових дій на ґрунтовий покрив та дистанційний моніторинг наслідків військових дій у Харківській області. Запропоновано методичні підходи до розрахунку відшкодування за шкоду, завдану продуктивним сільськогосподарським угіддям внаслідок збройної агресії.

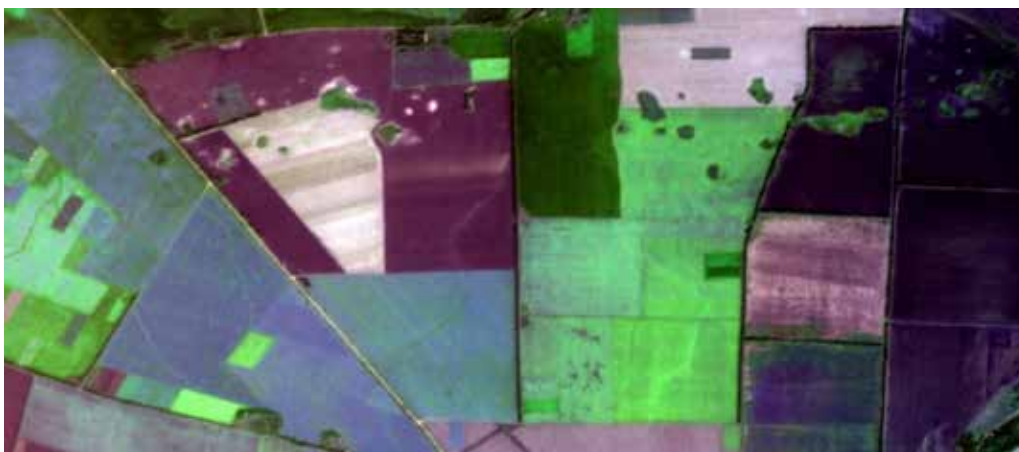
Розроблено концептуальні положення щодо відновлення та використання хімічно забруднених ґрунтів земельних ділянок внаслідок військового та техногенного впливу та нові методи боротьби



а



б



в

Рис. 7. Розвиток ерозійних процесів сільськогосподарських угідь (2021-2025)

Примітка: Верхній фрагмент (7а) – це зображення 2021 року, посередині (7б) – 2023 року, а (7с) – 2025 року.
Джерело: розроблено авторами на основі Planet Labs PBC

з деградацією. Зокрема, вченими розроблено методи покращення екологічного стану системи ґрунт-рослина з використанням нового хелатно-гуматного препарату Смарагд. Вчені також пропонують метод

активації біологічного потенціалу ґрунту шляхом біоре mediaції системи ґрунт – ґрунтові мікроорганізми – рослина, забрудненої важкими металами: біологічний препарат Хаупсин БТ з активними

штамами B-306 та B-111 бактерій *Pseudomonas aureofaciens* для внесення в ґрунт та підживлення рослин у фазі їх активного росту та розвитку.

Аналіз ступеня пошкодження ґрунтового покриву сільськогосподарських ресурсів на основі супутникових даних також можна знайти у статті О. Тараріко та ін. [20]. У статті висвітлено питання змін та наслідків військових дій на сільськогосподарські ресурси Лісостепу України за супутниковими показниками з використанням NDVI (Нормалізований індекс різниці рослинності). У статті зазначається концепція ідентифікаторів військового впливу на ґрунтовий покрив, який став аномальним після початку бойових дій 24 лютого 2022 року. Зокрема, встановлено факт військового впливу на ґрунтові ресурси трьох районів Харківської області. Серед основних ідентифікаторів впливу були: фізичний вплив (просідання різного походження, ущільнення ґрунту на сільськогосподарських угіддях України, порушення ґрунту внаслідок будівництва оборонних споруд тощо), антропогенний вплив (випалювання посівів, стан рослинності на сільськогосподарських угіддях), додавання об'єктів, аномальних для сільськогосподарських угідь (бетонні укриття, конічні піраміди «зуби дракона») [21]. Тому такі дослідження є актуальними та необхідними для інших регіонів України, які постраждали від військових дій.

Дещо інше дослідження було проведене Н. Куссолом та ін. [22], яке базувалося на методології машинного навчання та дистанційного зондування для виявлення військової шкоди сільськогосподарським угіддям в Україні з використанням безкоштовних супутникових даних Sentinel-2. У дослідженні проведено комплексну оцінку збитків, завданих сільськогосподарським угіддям України протягом періоду 2022-2023 років. Встановлено, що пошкоджено 1 544 952 га ґрунтів, що еквівалентно 5,72% від загальної сільськогосподарської площі, а найбільше постраждали Донецька, Запорізька та Херсонська області. У публікації Є. Бережняка та ін. [23] основна увага приділяється фізичній деградації ґрунту в Київській області, яка проявляється в ущільненні ґрунту в кратерах, утворених вибухами, особливо в середній частині (шар 50-60 см), де щільність складення досягала в середньому 1,68 г/см³. Помітне ущільнення ґрунту до 1,81 г/см³ виявлено в колях важкої військової техніки, що свідчить про розвиток фізичної деградації. За даними авторів, у зразках, взятих з периферійної частини кратера на різній глибині та його нижньої частини, зафіксовано вищу щільність ґрунту на 25,4-28,2%, порівняно з непошкодженими ґрунтами. Також вказується на наявність змішання генетичних горизонтів (явище педотурбації), спричинене вибухами снарядів артилерійської військової техніки.

І. Плisko та ін. [24] наголошують також на збільшенні величини щільності складення ґрунту на 0,39 г/см³, порівняно з контрольним варіантом,

у верхньому 0-10 см шарі ґрунту, де рухалася військова техніка. Подібну закономірність, зумовлену військовими діями, щодо збільшення щільності орного шару ґрунту та його кислотності для регіонів півдня України (Дніпропетровської, Запорізької та Миколаївської) областей виявлено у статті І. Бульби та ін. [25]. Подібні дослідження на території Чкаловської територіальної громади Чугуївського району Харківської області проводили В. Лебідь та ін. [26]. Авторами визначено найоптимальніші комбінації оптичних каналів супутників Sentinel-2 для відстеження наслідків військового впливу на ґрунтовий покрив. Створено шар просторових об'єктів відповідно до типів військової деградації ґрунтів громад. За допомогою супутникових знімків високої роздільної здатності на полігоні було розраховано кількість воронок та втрати ґрунту від вибухів, площу вигорілих ділянок та ущільнення, довжину протитанкових ровів та окопів з бліндажами. На зрушуваних землях Чкаловської територіальної громади було розраховано площі земель, що постраждали від обстрілів, та ділянки, що вигоріли внаслідок пожеж військового походження.

Розрахунок радіуса зони руйнування, формування кратерів та воронок, а також об'єму піднятого ґрунту розглянуто у статті В. Кузьменко та ін. [27]. У статті О. Бондаря та ін. [28] досліджено питання використання матеріалів дистанційного зондування (ДЗЗ) для оцінки накопиченої екологічної шкоди територіям внаслідок російсько-української війни. Доведено, що за допомогою аерокосмічних знімків можна ефективно контролювати та оцінювати патогенний вплив на навколишнє середовище, наслідки руйнування господарської діяльності у видобувній, гірничодобувній, збагачувальній, переробній та інших галузях промисловості, а також визначати кількісні та якісні показники забруднення та розміщення бойових (ракетних) відходів.

Слід зазначити, що від військових дій страждають не лише сільськогосподарські угіддя. Охоронні зони та території також зазнають значної шкоди. У статті О. Борисенка [29] зазначається, що понад 1,2 мільйона га земель природно-заповідного фонду розташовані в районах з підвищеним ризиком забруднення вибуховими речовинами, що ставить під загрозу можливість їхнього відновлення. Ефективним засобом відстеження порушень є використання геоінформаційних систем. Зазначається, що відновлення постраждалих територій вимагає очищення, рекультивації ґрунту, посадки нових дерев, відновлення лісових масивів та відновлення гідрологічного режиму, що буде спрямовано на збереження водного балансу та біорізноманіття.

У своїй роботі [30] вчені поєднали ГІС-аналіз та вторинні дані, включаючи зразки ґрунту, отримані під час польових експедицій, щоб надати докази того, як наземні бої, окупація, наземні міни

та вибухи можуть серйозно впливати на ґрунти. На регіональному рівні, на сільськогосподарських угіддях Сумського та Охтирського районів, у зразках ґрунту, взятих з місць розбиття авіабомб та знищеної військової техніки, визначено надлишок важких металів. Зокрема виявлено перевищення вмісту свинцю в 5,4, цинку в 3,9 та кадмію в 1,4 рази [31]. Найвищий ступінь порушення ґрунтового покриву спостерігався в місцях спалювання техніки (село Косівщина, село Старе Село, село Низи, Сумський район, Сумська область). Водночас, досліджень розвитку лінійних форм водної ерозії недостатньо, саме тому акцент було зосереджено саме на їх вивченні.

Загалом, агресія Російської Федерації проти України та значні площі порушених сільськогосподарських угідь, що виведені з експлуатації, фактично становлять загрозу глобальній продовольчій безпеці [32]. Щоб мінімізувати наслідки ерозії, виявленої на зображеннях Planet labs (рис. 7), рекомендується створювати буферні смуги в районах активного яроутворення та надавати пріоритет меліоративним роботам на землях з розораністю понад 77%.

Головні висновки. Встановлено, що регіон Великописарівської селищної громади, яка належить до прикордонних районів у Сумській області, є досить вразливим до пошкодження ґрунту внаслідок постійних бойових дій. Так, найбільша кількість вибухів з різних видів вогнепальної зброї в досліджуваній громаді сталася у березні 2024 року – 2653, причому домінуючими типами були вибухи від мінометного вогню – 730 та від реактивних систем залпового вогню (РСЗВ) – 601. Ґрунти також значно пошкоджуються від пусків керованих авіаційних бомб, некерованих авіаційних ракет, а також від скидання боєприпасів з безпілотників, які також руйну-

ють цілісність агроландшафтів, утворюючи кратери та западини з підняттям ґрунту. У майбутньому такі території потребуватимуть комплексного підходу до відновлення.

За допомогою методів дистанційного зондування та багаточасового аналізу супутникових даних візуально виявлено місця з відповідними негативними процесами ґрунтового покриву, що виникли або посилюються через те, що територія знаходилася у зоні бойових дій, а це унеможливило проведення захисних заходів на належному рівні. Зображення SuperDove завдяки вищій просторовій роздільній здатності мають перевагу над знімками Sentinel-2 для цієї мети. Такі зображення чітко демонструють розвиток ерозійних процесів, основною рушійною силою яких ми вважаємо постійні обстріли, як з наземної зброї, так і з повітря.

На основі ГІС-аналізу та лінійних вимірювань різночасових супутникових знімків у часовому ряду зображень фіксується розвиток яружної ерозії, що демонструє збільшення довжини яру на 166%. Натомість довжина найбільшого вимірюваного яру зросла за чотири роки на 175%.

Перспективи використання результатів досліджень. Отже, на цьому етапі досліджень проведено таке вимірювання та ідентифікацію вразливих зон ґрунтового покриву, а на основі аналізу матеріалів дистанційного зондування побудовано карту в програмному забезпеченні QGIS. На нашу думку, у майбутньому в межах Великописарівської територіальної громади необхідно буде контролювати ці небажані явища, щоб обґрунтувати їх морфологію і масштаби подальших проявів задля оцінювання збитків, а також розробити ефективні заходи із поліпшення й відновлення порушених ґрунтів.

Література

1. Ismayilov M., Kuchinskaya I., Karimova E. Impact of military conflicts on landscape transformation (a case study for the Aghdam district of the Republic of Azerbaijan). *Visnyk of Karazin Kharkiv National University*. Vol. 62. P. 194-204.
2. Broomandi P., Guney M., Kim J., Karaca F. Soil Contamination in Areas Impacted by Military Activities: a Critical Review. *Sustainability*. 2020. 12(21). 9002. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12219002>
3. Екоцид – злочин проти людяності. 2022. Веб-сайт. URL: <https://dnister.in.ua/articles/242090/ekocid-zlochin-proti-ljudstva> (дата звернення 18.02.2026).
4. Крахматова Д., Члек К. 57 тисяч вибухів. Наймасштабніший обстріл Сумської області у 2024 році. Веб-сайт. URL: <https://suspilne.media/sumy/915821-57-tis-vibuhiv-najbils-masstabni-obstrili-sumsini-u-2024-roci/> (дата звернення 02.03.2026).
5. Гончарова, А.Є. Вплив війни на ґрунти та сільськогосподарські угіддя: бібліометричний аналіз та вдосконалення методів оцінки збитків. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 4, С. 87-97.
6. Сумська обласна військова адміністрація. Веб-сайт. URL: <https://vpsr.gov.ua> (дата звернення 30.01.2026).
7. Яворська Т. Поля, вкриті дронами та вирви від бомб: як фермери Сумської області збирають врожай під обстрілами. 2025. Веб-сайт. URL: <https://espresso.tv/suspilstvo-polya-vkriti-dronami-ta-virvami-vid-bomb-yak-na-sumshchini-fermeri-pid-obstrilami-zbirayut-urozhay> (дата звернення 30.01.2026).
8. Deininger, K., Ali, D. A., Kussul, N., Shelestov, A., Lemoine, G., & Yailimova, H. Quantifying war-induced crop losses in Ukraine in near real time to strengthen local and global food security. *Food Policy*. 2023. 115, P. 102418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102418>
9. El Bilali, H., & Ben Hassen, T. Disrupted harvests: how Ukraine-Russia war influences global food systems – a systematic review. *Policy Studies*. 2024. № 45, Vol. 3–4; P. 310–335. DOI: <https://doi.org/10.1080/01442872.2024.2329587>
10. Пересадько В., Сержантова Ю., Борисенко К., Браславська О. Особливості картографічної візуалізації стану ландшафтів під час військових дій. *Проблеми безперервної географічної освіти та картографії*. 2023. Вип. 38. С. 32-39.
11. Ma Y., Dngmei L., Sun K., Li S., Zhu B., Zhao R., Zheng M., Song K. Spatiotemporal Analysis and War Impact Assessment of Agricultural Land in Ukraine Using RS and GIS Technology. *Land*. 2022. № 11, Vol.10. DOI: <https://doi.org/10.3390/land11101810>

12. Екосистема простору даних Copernicus. Веб-сайт URL: <https://dataspace.copernicus.eu/> (дата звернення 07.04.2026).
13. Офіційний веб-сайт Великописарівської територіальної громади. 2025. Веб-сайт. URL: <https://vpsr.gov.ua/> (дата звернення 10.02.2026).
14. Інститут вивчення війни (ISW). веб-сайт. URL: <https://understandingwar.org/>. (дата звернення 23.02.2026).
15. Макаренко Н.А. та ін. Вплив російської військової агресії на природні ресурси України: аналіз ситуації, методологія оцінки. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2022. № 4, Вип. 98. С. 1–31.
16. Строкаль В.П., Бережнюк Є.М., Наумовська О.І., Вагалюк Л.В., Ладика М.М., Сербенюк Г.А., Паламарчук С.П., Павлюк С.Д. Вплив російської агресії на стан природних ресурсів України: монографія. За ред. В.П. Строкаль. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2023. 218 с.
17. Стратегія розвитку Великописарівської територіальної громади до 2027 року. Веб-сайт. URL: https://rada.info/upload/users_files/04391262/8038bf0358233dc7e5d9c984d98a1e84.pdf (дата звернення 15.02.2026).
18. Бережнюк, Є. М., Наумовська, О. І. та Бережнюк, М. Ф. (2022). Деградаційні процеси в ґрунтах України та їх негативні наслідки для довкілля. *Біологічні системи: теорія та інновації*. 2022. № 13, т.3-4. С. 96-109.
19. Ґрунтовий покрив України в умовах воєнних дій: стан, проблеми, заходи з відновлення: монографія; за редакцією С. А. Балюка, А. В. Кучера, М. І. Ромащенко. Київ: Аграрна наука, 2024. 340 с.
20. Тараріко О.Г., Дем'янюк О.С., Ільєнко Т.В., Солоха М.О., Лиховид П.В. Супутниковий інформаційний ресурс – сучасний потенціал для вирішення екологічних проблем аграрного сектору України. *Збалансоване природокористування*. 2025. № 1. С. 55-71.
21. Солоха М.О., Коньшин Р.В., Дехтярьов В.В. Ідентифікатори впливу військових операцій на ґрунтовий покрив на основі супутникових даних. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 137. С. 235-244.
22. Куссул Н., Дрозд С., Яйлімова Г. Автоматизоване виявлення та оцінка збитків сільськогосподарським полям, завданих війною, за допомогою супутникових знімків. *Автоматизація технологічних та бізнес-процесів*. 2024. № 16. Т. 2. С. 63-74.
23. Бережнюк Є.М., Бондар В.І., Наумовська О.І., Ракоїд О.О., Клепо А.В., Ладика М.М., Лазарєв М.М., Дем'янюк О.С. Аналіз прояву деградаційних процесів ґрунтового покриву Київської області під впливом військових дій. *Збалансоване природокористування*. 2024. № 4. С. 116-128.
24. Пліско І.В., Романчук К.Ю., Криlach С.І. Механічна та фізична деградація орних ґрунтів внаслідок військових дій в Україні. *Вісник сільськогосподарської науки*. 2023. № 10. Вип. 847. С. 5-12.
25. Бульба І., Дробітько А., Задорожний Ю., Письменний О. Виявлення та моніторинг сільськогосподарських угідь, забруднених військовими діями. *Наукові горизонти*. 2024. № 27, т.7. С. 107–117.
26. Лебідь В., Солоха М., Соловей В., Кучер А., Воротинцева Л. Методологічні та практичні аспекти використання супутникових знімків для оцінки військового впливу на ґрунти. *Наукові горизонти*. 2024. № 27, т. 12. С. 56-75.
27. Кузьменко В.О., Третяк Н.М., Чорнай В.І., Яриш І.Ю. Військовий екоцид в Україні як згубний наслідок застосування російських ракет та снарядів. *Збірник наукових праць ДНДІ Збройних Сил України*. 2024. № 1, т.19. С. 62-72.
28. Бондар О.І., Фінін Г.С., Шевченко Р. Ю. Екологічні виклики воєнного часу: оцінка впливу на навколишнє середовище космічних систем дистанційного зондування та GPS-навігації. *Екологічні науки*. 2022. № 4, т.43. С. 40-49.
29. Борисенко О.Б., Кривохижа Е.М., Черноштан Т.М. Вплив військових дій на екосистеми: оцінка збитків та шляхи відновлення. *Екологічні науки*. 2025. № 1. С. 343-349.
30. Leal Filho W., Fedoruk M., Eustachio J., Splodytel A., Smaliychuk A., Szykowska-Jóźwik M. The environment as the first victim: The impact of war on protected areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364, P. C. 121399.
31. Зайцев Ю. О., Грищенко О. М., Романова С. А., Зайцева І. О. Вплив бойових дій на вміст валових форм важких металів у ґрунтах Сумського та Охтирського районів Сумської області. *Агроекологічний журнал*. 2022. № 3. С. 136-149.
32. Агресія Російської Федерації проти України як загроза глобальній продовольчій безпеці: аналітичний додаток / Бобровицький А. та ін.; за ред. М. Паламарчука. Київ, 2024. 80 с.

Дата першого надходження статті до видання: 20.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЗЕМЕЛЬНІ РЕСУРСИ ЯК ДОМІНАНТНА ТА СУБДОМІНАНТНА СКЛАДОВІ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ЕКОСИСТЕМ 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

Стверджується, що основою для визначення екосистем, у яких земельні 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, біомів – підзон, зон та країн України станом на 01.01.2022 р. Доводиться, що виявлення таких екосистем є передумовою обґрунтування пріоритетності перспективних напрямів збалансованого розвитку природокористування, насамперед, аграрного, сільськогосподарського, як на регіональному, так і на районному, локальному рівнях. З'ясовано, що серед 81 екосистеми України (починаючи від рівня 57 природних областей і закінчуючи 3-ма природними країнами) у 75 – земельні ресурси є домінантним (першим) та субдомінантним (другим) видом природних ресурсів за абсолютною величиною оцінки їх потенціалу в сумарному ПРП, що складає більше $\frac{9}{10}$ від загальної кількості екосистем названого ієрархічного рівня. Найбільшою є частка земельних ресурсів у сумарному ПРП у Південно-Молдавській схилово-височинній області (85,3%), Придністровсько-Східно-Подільській височинній (83,1%), Південно-Подільській височинній (82,7%), Південно-Подільській схилово-височинній (75,2%), Південно-Придніпровській височинній (74,2%), Середньоподільській височинній (73,8%) областях, Подільсько-Придніпровській провінційній екосистемі (72,7%), Задністровсько-Причорноморській низовинній (72,6%), Північно-Західній височинній (72,4%) та Середньобуззькій височинній (71,2%) областях. Отже, йдеться, насамперед, про лісостепові екосистеми України (сім з десяти названих). Субдомінантні за роллю земельних ресурсів у сумарному ПРП екосистеми України розміщуються, як правило, у Північностеповій підзоні (Лівобережно-Дніпровська-Приазовська, Донецька та Задонецько-Донська провінційні екосистеми) та в Кримській гірській провінційній екосистемі. Екосистем, у яких частка земельних ресурсів у сумарному ПРП менша за 40% в Україні майже $\frac{1}{3}$ (30%), четверта частина екосистем та, де земельні багатства становлять від 40 до 55 відсотків інтегрального потенціалу. Ще $\frac{1}{3}$ всіх екосистем України мають земельний потенціал на рівні від 55 до 70%. І, нарешті, лише 15 відсотків екосистем країни характеризується земельними ресурсами, місце яких у сумарному ПРП території є більшим за 70%. Оцінка місця, ролі земельного потенціалу екосистем у ПРП регіонів – перспективний шлях до сталого розвитку їх природокористування. *Ключові слова:* домінантні і субдомінантні земельні ресурси, природно-ресурсний потенціал, екосистеми, біоми України.

Land resources as dominant and subdominant components of nature-resource potential of ecosystems of Ukraine. Rudenko S., Rudenko V.

The article **aims at** the establishment of the role and the significance of land resources in those ecosystems of Ukraine where they take the lead in the components structure of the nature-resource potential, that is, where they are dominant (first) or subdominant (second) types of nature resources when we speak of the absolute value of their potential.

The research applies the **methods** of ecological-economic (cost) revaluation of nature-resource potential (NRP) of Ukrainian ecosystems that covers the potentials of mineral, water, land, forest, fauna and natural recreation resources as of 01.01.2022, said revaluation being carried out in the aspect of 278 natural rayons, 57 oblasts, 14 provincial ecosystems, biomes – 3 subzones, 4 biomes-zones, and 3 natural countries of this country.

The analysis revealed that, among 81 ecosystems of Ukraine (beginning from the level of 57 oblasts and ending with 3 natural countries), 75 of them have land resources as dominant (first) and subdominant (second) types of nature resources with regard to absolute value of their potentials within the total NRP, this making over $\frac{9}{10}$ of the totality of Ukrainian ecosystems of the above-said hierarchical level. The biggest share of land resources within the total NRP is observed in the South-Moldavian Slope-Upland Oblast (85,3%), Prydnistrovsko-East-Podillia Upland Oblast (83,1%), South-Podillia Upland Oblast (82,7%), South-Podillia Slope-Upland Oblast (75,2%), South-Prydniprovskia Upland Oblast (74,2%), Mid-Podillia Upland Oblast (73,8%), Podilsko-Prydnistrovskia Provincial Ecosystem (72,7%), Zadnistrovsko-Prychornomorska Lowland Oblast (72,6%), North-Western Upland Oblast (72,4%), and Mid-Bug Upland Oblast (71,2%). Hence, we in the first turn speak of the Forest-Steppe ecosystems of Ukraine (seven out of ten). Ukrainian ecosystems where land resources play subdominant role in the total NRP are as a rule found in the North-Steppe Subzone (Left-Bank-Dnieper Pryazovska Provincial Ecosystem, Donetsk Provincial Ecosystem, Zdonetsk-Donska Provincial Ecosystem), and in the Crimean Mountainous Provincial Ecosystem. Ecosystems with the less than 40% share of land resources in the total NRP make almost $\frac{1}{3}$ of their totality (30%), and the $\frac{1}{4}$ of them possess the land wealth within the range of 40% to 55% out of the integral



potential. Another 1/3 of all Ukrainian ecosystems have land potential at the level of 55% to 70%. And, finally, only 15% of the country's ecosystems are characterized by land resources whose share in the total NRP of the territory exceeds 70%.

The **scientific novelty** of the research lies in the assessment of dominant and subdominant role of land resources in the structure of the integral nature-resource potential of ecosystems of Ukraine (from the level of natural oblasts to the same of the biomes-natural countries).

The **practical effect** of the research lies in the establishment of the priorities towards perspective directions of sustainable development of Ukrainian ecosystems' nature use. *Key words:* dominant and subdominant land resources, nature-resource potential, ecosystems, biomes of Ukraine.

Актуальність роботи. Земельні ресурси, агро-промисловий комплекс України, їх сталий розвиток, безсумнівно, є визначальними складовими національної економіки, що формують провідні позиції нашої держави у світі за її експортним потенціалом. Згідно з чинним законодавством України, центральним органом виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері земельних відносин, землеустрою, у сфері Державного земельного кадастру є Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру [1]. Земельні відносини в Україні регулюються Конституцією України, Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [2], Земельним кодексом України [3] та іншими законодавчими актами України [4]. У названих документах стверджується, що земельні ресурси України є її національним багатством, провідною складовою екосистем та їх природно-ресурсного потенціалу, що включає мінеральні, водні, земельні, лісові, фауністичні та природно-рекреаційні компоненти. Звісно, місце, значення земельних ресурсів в екосистемах різного ієрархічного рівня можуть бути відповідно оцінені лише в єдиній системі природно-ресурсних кадастрів через еколого-економічний (вартісний) вимір продуктивності усього природно-ресурсного комплексу держави. Нами здійснена переоцінка ПРП екосистем України у розрізі її первинних 278 природних районів, 57 областей, 14 провінційних екосистем, чотирьох біомів – природних зон, трьох підзон, трьох країн станом на 01.01.2022р. [5], з допомогою якої можна визначити ті екосистеми, у яких земельні ресурси є першими (домінантними) чи другими (субдомінантними) складовими у компонентній структурі потенціалу природних продуктивних сил. Безсумнівно, якщо земельні ресурси у сумарному ПРП екосистем займають такі провідні позиції, – не важко обґрунтувати, що саме вони визначатимуть пріоритети перспективного сталого розвитку регіонального природокористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Земельні ресурси, їх місце в екосистемах України, Європи, світу загалом є об'єктом дослідження багатьох науковців, творчих колективів. Так, зокрема, М.А. Голубець [6], у тому числі і зі співавторами [7], виокремлюють земельні ресурси як одну з найважливіших компонентів екологічного потенціалу наземних екосистем, стверджують, що екологічний потенціал визначається структурою ландшафту, який зазнає істотної антропогенної трансформа-

ції. М.Д. Гродзинський у розробленій ним концепції типів ландшафтних територіальних структур, саме з земельними багатствами пов'язує утримання стійкості геосистем до антропогенних навантажень [8]. С.А. Балюк зі співавторами, фундаментально досліджують сучасний стан, еволюцію, охорону та стає управління українськими чорноземами, шляхи підвищення їх продуктивності [9]. Ю.С. Кравченко [10], О.В. Браславська, О.М. Гриник та Т.А. Рожі [11], поглиблено вивчають стан та перспективи відновлення родючості чорноземів України. Надзвичайно актуальними є аналіз динаміки земельного фонду, екологічні оцінки стану ґрунтів України після 24 лютого 2022 р., в зонах ведення активних бойових дій внаслідок російської агресії [12; 13]. О.Л. Герасимчук з колегами [14], акцентують увагу сучасних дослідників на підходах до управління та відновлення деградованих земель через інноваційні інструменти землеустрою. Учені з зарубіжних країн – М.К. Джарія з колективом [15], Т.С. Кіннаман [16], Л. Кртічка з колегами [17], А.Е. Мартін зі співавторами [18], розробляють питання збалансованого освоєння, охорони та відтворення природних, зокрема, земельних ресурсів, їх сталого розвитку, земельно-ресурсного менеджменту. Проте, слід констатувати, що проблеми кількісної оцінки ролі, значення земельних ресурсів у складі інтегрального (сумарного) природно-ресурсного потенціалу у розрізі первинних екосистем районного, обласного рівнів, провінційних екосистем, підзон, біомів – природних зон і природних країн України досліджені ще недостатньо. Саме тому, **головною метою нашої розвідки** є з'ясування ролі, значення земельних ресурсів у тих екосистемах України, де вони займають ключові позиції у компонентній структурі ПРП, тобто де вони є доміантними (першими) або субдомінантними (другими) видами природних ресурсів за абсолютною величиною їх потенціалу.

Матеріали та методи дослідження. Абсолютна величина земельного потенціалу у вартісній оцінці сумарного ПРП стала основною для визначення тих екосистем України, у яких земельні комплекси займають першу чи другу позиції у компонентній структурі потенціалу. У поданій нижче табл. 1 отримані результати характеризують місце земельних ресурсів у сумарному потенціалі екосистем України від рівня їх природних областей, провінційних екосистем, біомів – природних підзон, зон, країн. Матеріали для її складання почерпнуті з [5].

Таблиця 1

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

Земельні ресурси як:			
домінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %	субдомінантний вид ПРП (назва екосистеми)	частка у структурі ПРП, %
1	2	3	4
Східно-Європейська рівнина – біом	46,3		
Зона мішаних лісів – біом	49,8		
Поліська провінційна екосистема	49,8		
<i>I. Область Волинського Полісся</i>	43,8		
<i>II. Область Малого Полісся</i>	59,9		
<i>III. Область Житомирського Полісся</i>	52,5		
<i>IV. Область Київського Полісся</i>	41,0		
<i>V. Область Чернігівського Полісся</i>	40,2		
<i>VI. Область Новгород-Сіверського Полісся</i>	58,4		
Зона широколистяних лісів – біом	63,5		
Західно-Українська провінційна екосистема	63,5		
<i>VII. Волинська височинна область</i>	64,4		
<i>VIII. Розтоцько-Опільська горбогірна область</i>	37,2		
<i>IX. Західно-Подільська височинна область</i>	68,6		
<i>X. Середньоподільська височинна область</i>	73,8		
<i>XI. Прут-Дністровська височинна область</i>	66,4		
Лісостепова зона – біом	68,2		
Подільсько-Придніпровська провінційна екосистема	72,7		
<i>XII. Північно-Західна Придніпровська височинна область</i>	72,4		
<i>XIII. Північно-Східна Придніпровська височинна область</i>	73,1		
<i>XIV. Київська височинна область</i>	63,2		
<i>XV. Придністровсько-Східно-Подільська височинна область</i>	83,1		
<i>XVI. Середньобузька височинна область</i>	71,2		
<i>XVII. Центральнопридніпровська височинна область</i>	67,5		
<i>XVIII. Південно-Подільська височинна область</i>	82,7		
<i>XIX. Південно-Придніпровська височинна область</i>	74,2		
Лівобережно-Дніпровська провінційна екосистема	66,7		
<i>XX. Північно-Придніпровська терасова низовинна область</i>	69,5		
<i>XXI. Північно-Полтавська височинна область</i>	69,0		
<i>XXII. Східно-Полтавська височинна область</i>	60,1		
<i>XXIII. Південно-Придніпровська терасова низовинна область</i>	65,5		
Східно-Українська провінційна екосистема	55,1		
<i>XXIV. Сумська схилово-височинна область</i>	65,9		
<i>XXV. Харківська схилово-височинна область</i>	49,7		
Степова зона – біом			33,2
Північно-степова підзона – біом			26,7
Дністровсько-Дніпровська провінційна екосистема			42,3

Продовження табл. 1

1	2	3	4
<i>XXVI. Південно-Молдавська схилово-височинна область</i>	85,3		
<i>XXVII. Південно-Подільська схилово-височинна область</i>	75,2		
		<i>XXVIII. Південно-Придніпровська схилово-височинна область</i>	32,5
Лівобережно-Дніпровсько-Приазовська провінційна екосистема			34,7
		<i>XXIX. Орільсько-Самарська низовинна область</i>	28,0
		<i>XXX. Кінсько-Ялинська низовинна область</i>	37,6
<i>XXXI. Приазовська височинна область</i>	58,4		
<i>XXXII. Приазовська низовинна область</i>	42,8		
		Донецька провінційна екосистема	12,9
		<i>XXXIII. Західно-Донецька схилово-височинна область</i>	20,5
		<i>XXXIV. Донецька височинна область</i>	8,2
		Задонецько-Донська провінційна екосистема	20,6
		<i>XXXV. Старобільська схилово-височинна область</i>	20,6
Середньостепова підзона – біом	62,1		
Причорноморська провінційна екосистема	62,1		
<i>XXXVI. Задністровсько-Причорноморська низовинна область</i>	72,6		
<i>XXXVII. Дністровсько-Бузька низовинна область</i>	53,0		
<i>XXXVIII. Бузько-Дніпровська низовинна область</i>	68,6		
<i>XXXIX. Дніпровсько-Молочанська низовинна область</i>	58,3		
<i>XL. Західно-Приазовська схилово-височинна область</i>	51,4		
Південнестепова (сухостепова) підзона – біом	50,1		
Причорноморсько-Приазовська провінційна екосистема	59,7		
<i>XLI. Нижньобузько-Дніпровська низовинна область</i>	44,6		
<i>XLII. Нижньодніпровська терасово-дельтова низовинна область</i>	66,3		
<i>XLIII. Присивасько-Приазовська низовинна область</i>	64,5		
Кримська степова провінційна екосистема			
	43,2		
<i>XLIV. Присивасько-Кримська низовинна область</i>	39,7		
<i>XLV. Тарханкутська височинна область</i>	61,2		
<i>XLVI. Центральнокримська височинна область</i>	39,8		
		<i>XLVII. Керченська горбистопасмова область</i>	26,6

1	2	3	4
		Кримські гори – біом	34,7
		Кримська гірська провінційна екосистема	34,7
		<i>I. Передгірно-Кримська область</i>	31,6
		<i>II. Гірсько-Кримська область</i>	36,5
		<i>III. Південнобережно-Кримська область</i>	38,8
Українські Карпати – біом			21,2
<i>I. Передкарпатська височинна область</i>	28,5		
<i>VII. Закарпатська низовинна область</i>	41,5		
Україна	44,3		

Результати та їх обговорення. Серед 81 екосистеми України (від рівня 57 природних областей, 14 провінційних екосистем, 3-х біомів – підзон, 4-х біомів – природних зон та 3-х природних країн) у 75 земельні ресурси є домінантним (першим) та субдомінантним (другим) видом природних ресурсів за абсолютною величиною оцінки їх потенціалу в сумарному ПРП. Це складає майже 93% від загальної кількості екосистем України вказаного ієрархічного рівня. З них – у 57 екосистемах країни земельні багатства є домінантними (70,4%), у 24-х – субдомінантними (29,6%) природними ресурсами.

Як бачимо, земельний потенціал є визначальним у структурі природних продуктивних сил держави, характеризуючи загалом понад $\frac{9}{10}$ її природних комплексів. Найбільшою є частка земельних ресурсів у сумарному ПРП у Південно-Молдавській схилово-височинній області (85,3%), Придністровсько-Східно-Подільській височинній (83,1%), Південно-Подільській височинній (82,7%), Південно-Подільській схилово-височинній (75,2%), Південно-Придніпровській височинній (74,2%), Середньоподільській височинній (73,8%) областях, Подільсько-Придніпровській провінційній екосистемі (72,7%), Задністровсько-Причорноморській низовинній (72,6%), Північно-Західній височинній (72,4%) та Середньобузькій височинній (71,2%) областях. Отже, йдеться, насамперед, про лісостепові екосистеми України (сім з десяти названих).

Субдомінантні за роллю земельних ресурсів у сумарному ПРП екосистеми України розміщуються, як правило, у північностеповій підзоні (Лівобережно-Дніпровсько-Приазовська, Донецька та Задонецько-Донська провінційні екосистеми) та в Кримській гірській провінційній екосистемі.

Варто відзначити, що екосистем, у яких частка земельних ресурсів у сумарному ПРП менша за 40% в Україні майже $\frac{1}{3}$ (30%), четверта частина екосис-

тем та, де земельні багатства становлять від 40 до 55 відсотків інтегрального потенціалу. Ще $\frac{1}{3}$ всіх екосистем України мають земельний потенціал на рівні від 55 до 70%. І, нарешті, лише 15 відсотків екосистем країни характеризуються земельними ресурсами, місце яких у сумарному ПРП території є більшим за 70%.

Висновки. З'ясовано, що земельні ресурси за абсолютною величиною потенціалу у компонентній структурі сумарного ПРП України є першим (домінантним) або другим (субдомінантним) видом природних багатств у 75 (з 81) екосистемах держави, починаючи від рівня природних областей, провінційних екосистем, біомів – природних підзон, зон і закінчуючи природними країнами. Це складає більше $\frac{9}{10}$ від загальної кількості екосистем України вказаного ієрархічного рівня. Найбільшою є частка земельних як домінантних ресурсів у сумарному ПРП у Південно-Молдавській схилово-височинній області (85,3%), Придністровсько-Східно-Подільській височинній (83,1%), Південно-Подільській височинній (82,7%), Південно-Подільській схилово-височинній (75,2%), Південно-Придніпровській височинній (74,2%), Середньоподільській височинній (73,8%) областях, Подільсько-Придніпровській провінційній екосистемі (72,7%). Як субдомінантні за роллю земельних ресурсів у сумарному ПРП, екосистеми України, як правило, розміщуються у Північностеповій підзоні та в Кримській гірській провінційній екосистемі. Майже $\frac{1}{3}$ екосистем України має частку земельних ресурсів у сумарному ПРП до 40%, $\frac{1}{4}$ частина екосистем та, де земельні багатства складають від 40 до 55 відсотків інтегрального потенціалу. Ще $\frac{1}{3}$ всіх екосистем України мають земельний потенціал на рівні від 55 до 70% і лише 15 відсотків екосистем країни – ті, питома вага земельного потенціалу яких у складі сумарного ПРП перевищує 70%.

Література

1. Про Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру: Постанова Кабінету Міністрів України; Положення від 14.01.2015 № 15. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/15-2015-%D0%BF> (дата звернення: 07.04.2026).
2. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-ХІІ. База даних. «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12> (дата звернення 07.04.2026).
3. Земельний кодекс України: Кодекс України; Кодекс, Закон від 25.10.2001 № 2768-ІІІ. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2768-14> (дата звернення: 07.04.2026).
4. Про природно-заповідний фонд України: Закон України 16.06.1992 № 2456-ХІІ. 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 : Чернівець. 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. 180 с.
8. Гродзинський М.Д. Пізнання ландшафту: місце і простір: Монографія. У 2-х т. К.: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2005. Т.1. 431 с.
9. Балюк С.А., Воротинцева Л.І., Соловей В.Б., Шимель В.В. Реалії українського чорнозему: сучасний стан, еволюція, охорона та стале управління. *Вісник аграрної науки*, 2023. № 3. С. 5-13. DOI: <https://doi.org/10.31073/agrovisnyk202303-01>.
10. Кравченко Ю. С. Сучасний стан родючості українських чорноземів. *Рослинництво та ґрунтознавство*, 2019. Том 10, № 3. С. 29-35. DOI: <https://doi.org/10.31548/agr2019.03.029>.
11. Браславська О.В., Грицик О.М., Рожі Т.А. Географія ґрунтів: історичні зміни, сучасний стан та перспективи відновлення чорноземів України. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. Київ: Видавничий дім «Гельветика», 2025. № 1(58). С. 173-180. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.29>.
12. Ніколюк О., Пивовар П., Назаркіна Р., Стольнікович Г., Богонос М. Динаміка земельного фонду: як змінилися земельні ресурси України після 24 лютого 2022 року. Центр досліджень продовольства та землекористування. Київська школа економіки, 2024. 12 с.
13. Шеліна Є., Міхєєв О., Мавджд С., Маринін А., Якименко І. Екологічна оцінка стану ґрунтів України зони ведення активних бойових дій. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Голов. Ред. Бондар О.І. К.: Видавн. дім «Гельветика», 2025. № 6(63). С. 132-136. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.21>.
14. Герасимчук О.Л., Шевчук Л.М., Васильєва Л.А., Кагукіна А.М. Сучасні підходи до управління та відновлення деградованих земель через інноваційні інструменти землеустрою. *Екологічні науки: науково-практичний журнал* / Голов. ред. Бондар О.І. К.: Видавн. дім «Гельветика», 2025. № 3(60). С. 56-60. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.10>.
15. Jhariya, M.K., Meena, R.S., Banerjee, A. Ecological Sntensification of Natural Resources for Sustainable Agriculture. *Springer Singapore*. 2021. 655 p. DOI <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4203-3>.
16. Kinnaman, T.C. A New Perspective on the Natural Resource Curse. *World*. 4(4). 2023. 670. DOI: <https://doi.org/10.3390/world4040042>.
17. Kricka, L., Tomchikov, I., Rakytova, I. Development versus conservation: evaluation of landscape structure changes in Demanovska Valley. Slovakia. *Jornal of Mountain Science*. 2018. Vol. 15. 1153 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11629-018-4870-0>.
18. 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: 01.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

МОНІТОРИНГ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПИТНОЇ ВОДИ У СИСТЕМІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ М. ЖИТОМИР ЗА 2020–2025 РР.

Бобков М.О., Піциль А.О.

Поліський національний університет

Старий бульв., 7, 10002, м. Житомир

bobkovmaksim412@gmail.com

У статті проаналізовано динаміку 10 показників якості питної води в системі централізованого водопостачання м. Житомир (КП «Житомирводоканал») за період 2020–2025 рр. на основі 72 щомісячних протоколів вимірювань акредитованої контрольної-вимірювальної лабораторії підприємства, оприлюднених у відкритому доступі на офіційному сайті комунального підприємства [6]. Досліджено такі фізико-хімічні та мікробіологічні параметри: каламутність, забарвленість, водневий показник (рН), хлориди, амоній-іони, нітрати, залізо загальне, сухий залишок, марганець та загальне мікробне число (ЗМЧ). Встановлено, що концентрації переважної більшості досліджуваних показників не перевищували пом'якшених нормативних значень ДСанПіН 2.2.4-171-10 протягом усього шестирічного досліджуваного періоду. Виявлено стійке систематичне перевищення жорсткого нормативу каламутності (0,58 мг/дм³) при одночасній повній відповідності пом'якшеному нормативному значенню (2,03 мг/дм³).

Ідентифіковано хронічну сезонну проблему підвищеного забруднення води марганцем: щороку у теплий період червня-вересня концентрація цього елементу стабільно перевищує жорсткий норматив (0,05 мг/дм³), а у 2021 та 2024 роках зафіксовано перевищення і пом'якшеного нормативу (0,5 мг/дм³) із максимальним зафіксованим значенням 1,19 мг/дм³ у липні 2024 р. Поряд із цим зафіксовано виражену позитивну тенденцію до зниження середньорічної концентрації хлоридів (на 21,7% за шість років) та суттєвого покращення мікробіологічних показників якості води: загальне мікробне число знизилось у 4,6 рази порівняно з початком досліджуваного періоду. Решта мікробіологічних показників (загальні коліформи, ентерококи, коліфаги) стабільно відповідали встановленим нормативним вимогам протягом усього аналізованого періоду. *Ключові слова:* питна вода, якість води, марганець, нітрати, каламутність, ДСанПіН 2.2.4-171-10, моніторинг, централізоване водопостачання, м. Житомир, сезонна динаміка, деманганізація.

Monitoring of Drinking Water Quality Indicators in the Centralized Water Supply System of Zhytomyr for 2020–2025.
Bobkov M., Pitsil A.

The article analyses the dynamics of 10 drinking water quality indicators in the centralized water supply system of Zhytomyr (Municipal Enterprise «Zhytomyrvodokanal») for the period 2020–2025, based on 72 monthly measurement protocols of the enterprise's accredited control and measurement laboratory, published in open access on the official website of the enterprise [6]. The following physicochemical and microbiological parameters were studied: turbidity, colour, hydrogen potential (pH), chlorides, ammonium ions, nitrates, total iron, dry residue, manganese, and total microbial count (TMC). It was established that the concentrations of the vast majority of the studied indicators did not exceed the relaxed normative values of DSanPiN 2.2.4-171-10 throughout the entire six-year study period. A persistent systematic exceedance of the strict turbidity standard (0.58 mg/dm³) was identified, while full compliance with the relaxed normative value (2.03 mg/dm³) was maintained.

A chronic seasonal problem of elevated manganese contamination was identified: every year during the warm season of June – September, the concentration of this element consistently exceeds the strict standard (0.05 mg/dm³), and in 2021 and 2024 exceedances of the relaxed standard (0.5 mg/dm³) were also recorded, with a maximum value of 1.19 mg/dm³ in July 2024. At the same time, a pronounced positive trend was recorded in the reduction of average annual chloride concentrations (by 21.7% over six years) and a substantial improvement in microbiological water quality indicators: the total microbial count decreased 4.6-fold compared to the beginning of the study period. The remaining microbiological indicators (total coliforms, enterococci, coliphages) consistently complied with the established normative requirements throughout the entire analysed period. *Key words:* drinking water, water quality, manganese, nitrates, turbidity, DSanPiN 2.2.4-171-10, monitoring, centralized water supply, Zhytomyr, seasonal dynamics, demanganation.

Постановка проблеми. Якість питної води – логічної безпеки урбанізованих територій. Місто Житомир значний адміністративний і промисловий центр Поліського регіону з населенням понад



260 тисяч осіб – критично залежить від якості питної води системи централізованого водопостачання КП «Житомирводоканал». Основним джерелом водопостачання слугує р. Тетерів – права притока Дніпра першого порядку довжиною 365 км із площею водозбірної басейну 15 300 км² [1]. Гідрохімічний режим річки формується під впливом геологічної будови басейну, зарегульованості стоку каскадом водосховищ та інтенсивного антропогенного навантаження [2, 3]. Систематичний лабораторний контроль виявляє ряд показників, що стабільно відхиляються від жорстких нормативів ДСанПіН 2.2.4-171-10, що зумовлює необхідність комплексного статистичного аналізу для наукового обґрунтування рішень щодо модернізації водопідготовки.

Актуальність дослідження. Проблема якості питної води набула особливої гостроти в умовах прогресуючого антропогенного навантаження на басейн р. Тетерів та значного зносу інфраструктури водопідготовки. За даними національних доповідей про якість питної води в Україні, більш ніж 70% поверхневих джерел водопостачання, які забезпечують водою переважну більшість населення країни, віднесено до забруднених або дуже забруднених [4, 5]. Попри наявність щомісячного лабораторного контролю якості питної води та регулярне оприлюднення його результатів КП «Житомирводоканал» на офіційному сайті підприємства [6], комплексний статистичний аналіз багаторічних рядів спостережень із виявленням тенденцій і сезонних закономірностей у науковій літературі представлений недостатньо. Це визначає актуальність і практичну цінність проведеного дослідження для органів управління водними ресурсами та підприємств водопостачання.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконане в рамках підготовки дисертаційної роботи на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності Е2 Екологія (тема: «Оцінка екологічного ризику антропогенного навантаження на якісний стан водних ресурсів в м. Житомир»). Результати роботи безпосередньо пов'язані з практичними потребами КП «Житомирводоканал» та органів управління водними ресурсами регіону у достовірній інформації про стан питного водопостачання для планування водоохоронних заходів та модернізації систем водопідготовки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання якості поверхневих і питних вод басейну р. Тетерів досліджувалося у ряді наукових праць. Кірейцева Г.В. та співавтори [7] проаналізували гідроекологічний стан р. Тетерів у межах урбоекосистеми м. Житомир, застосувавши модифіковану модель Стрітера-Фелпса для прогнозування кисневого режиму та потенціалу евтрофікації за ретроспективними гідрохімічними даними 2019–2023 рр. Гігієнічні проблеми питного водопостачання насе-

лення України розглядалися у фундаментальних роботах Прокопова В.О. [8], Гончарука В.В. [9], Чегус В.В. та Герасимчук Л.О. [10] які здійснили оцінку якості води р. Тетерів як питного водозбору м. Житомир за 2003–2019 рр. відповідно до ДСТУ 4808:2007, встановивши, що інтегральний показник якості відповідав 2 класу («добра вода») і змінювався у діапазоні від 2,07 до 2,50. Разом з тим, комплексний аналіз багаторічної динаміки показників якості питної води безпосередньо у системі централізованого водопостачання м. Житомир за сучасний тривалий період (2020–2025 рр.) висвітлений недостатньо повно.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми та новизна досліджень. Незважаючи на наявність окремих досліджень якості вод басейну р. Тетерів, у науковій літературі відсутній систематизований аналіз багаторічної динаміки показників якості питної води у системі централізованого водопостачання м. Житомир за 2020–2025 рр. Новизна дослідження полягає у вперше проведеному комплексному аналізі шестирічної динаміки 10 показників якості питної води із виявленням тенденцій, сезонних закономірностей та оцінкою відповідності нормативам ДСанПіН 2.2.4-171-10.

Мета роботи. Мета роботи: проаналізувати динаміку показників якості питної води у системі централізованого водопостачання м. Житомир за 2020–2025 рр., виявити сезонні закономірності та тенденції зміни ключових параметрів, оцінити відповідність нормативам ДСанПіН 2.2.4-171-10 та обґрунтувати пріоритетні напрями вдосконалення технології водопідготовки.

Виклад основного матеріалу. Матеріалом для написання статті слугували протоколи вимірювань показників якості питної води контрольно-виміральної лабораторії КП «Житомирводоканал» за 2020–2025 рр. (72 щомісячних протоколи), оприлюднені у відкритому доступі на офіційному сайті підприємства у розділі «Споживачам – Якість води» [6]. Лабораторія має сертифікат підтвердження компетентності та функціонує відповідно до програми контролю якості води, затвердженої Житомирським міським управлінням Головного управління Держпродспоживслужби в Житомирській області. Контрольно-вимірвальна лабораторія складається з трьох відділів (хіміко-технологічного, біологічного та радіологічного) і здійснює безперервний цілодобовий контроль якості води з Денишівського та Відсічного водосховищ на всіх етапах очищення за 48 показниками: мікробіологічними, паразитологічними, санітарно-хімічними та радіологічними. Нами проаналізовано динаміку таких показників: каламутність (мг/дм³), водневий показник (рН), забарвленість (градуси), хлориди (мг/дм³), амоній-іони (мг/дм³), нітрати (мг/дм³), залізо загальне (мг/дм³), сухий залишок (мг/дм³), марганець (мг/дм³) та загальне мікробне число (КУО/см³). Отримані

дані порівнювались із нормативними показниками ДСанПіН 2.2.4-171-10 [11].

Для значень, що реєструвались нижче межі виявлення (позначення «<» у протоколах), у розрахунках використовувалось значення, що дорівнює половині межі виявлення. Статистична обробка результатів включала розрахунок середніх річних значень, мінімальних та максимальних концентрацій для кожного показника. Середні річні значення показників якості питної води м. Житомир за 2020–2025 рр. наведено у таблиці 1, а їхні статистичні характеристики – у таблиці 2. У дужках (табл. 1, 2) пом'якшений норматив, що має право використовувати підприємство

водопостачання в окремих випадках відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10. У кожній клітинці таблиці 2 верхнє значення – середнє річне, нижнє курсивом – діапазон мін – макс.

Каламутність. Протягом усього досліджуваного періоду 2020–2025 рр. каламутність питної води стабільно перевищувала жорсткий норматив ДСанПіН 2.2.4-171-10 (0,58 мг/дм³). Середньорічні значення коливались у діапазоні від 1,016 мг/дм³ (2020 р.) до 1,321 мг/дм³ (2023 р.). При цьому пом'якшений норматив (2,03 мг/дм³), передбачений для підприємств водопостачання в особливих умовах, не перевищувався жодного разу за весь аналізований період.

Таблиця 1

Середні річні значення показників якості питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

Показник	Норма (ДСанПіН)	Од. вим.	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Каламутність	≤0.58	мг/дм³	1.016	1.126	1.032	1.321	1.245	1.242
Забарвленість	≤20.0 (35.0)	градуси	11.50	12.42	11.84	13.67	11.75	10.33
pH	6,5–8,5	од. pH	7.125	7.173	6.912	6.737	7.048	7.306
Хлориди	≤250.0 (350.0)	мг/дм³	44.84	43.04	42.09	39.70	37.71	35.12
Амоній	≤0.5 (2.6)	мг/дм³	0.0988	0.0917	0.0633	0.1483	0.1417	0.1242
Нітрати	≤50.0	мг/дм³	2.195	2.098	1.602	5.463	1.724	1.012
Залізо загальне	≤0.2 (1.0)	мг/дм³	0.0883	0.1350	0.1133	0.1700	0.1633	0.1350
Сухий залишок	≤1000.0 (1500.0)	мг/дм³	260	263	262	218	231	236
Марганець	≤0.05 (0.5)	мг/дм³	0.0439	0.1127	0.0636	0.0754	0.2528	0.0493
ЗМЧ t37°C	≤50.0	КУО/см³	2.667	3.250	1.167	2.167	1.083	0.5833

Таблиця 2

Статистичні характеристики показників якості питної води
питного водозабору м. Житомир (2020–2025 рр.)

Рік	Каламутність, мг/дм³	Забарвленість, градуси	pH, од. pH	Хлориди, мг/дм³	Амоній, мг/дм³	Нітрати, мг/дм³	Залізо заг., мг/дм³	Сухий залишок, мг/дм³	Марганець, мг/дм³	ЗМЧ, КУО/см³
ГДК	≤0.58 (2.03)	≤20.0 (35.0)	6,5–8,5	≤250.0 (350.0)	≤0.5 (2.6)	≤50.0	≤0.2 (1.0)	≤1000.0 (1500.0)	≤0.05 (0.5)	≤50.0
2020	1.016 0.560–1.780	11.5 8.0–24.0	7.12 6.72–7.45	44.84 28.15–61.49	0.099 0.053–0.160	2.20 0.44–5.90	0.088 0.050–0.110	260 229–351	0.0439 0.0100–0.1810	2.67 1.00–7.00
2021	1.126 0.650–1.660	12.4 8.0–25.0	7.17 6.78–7.38	43.04 34.27–60.11	0.092 0.025–0.270	2.10 0.22–6.33	0.135 0.100–0.190	263 190–354	0.1127 0.0133–0.7230	3.25 1.00–7.00
2022	1.032 0.700–1.330	11.8 7.6–19.0	6.91 6.67–7.22	42.09 37.12–52.1	0.063 0.025–0.120	1.60 0.44–3.20	0.113 0.100–0.130	262 207–291	0.0636 0.0070–0.2760	1.17 0.00–2.00
2023	1.321 0.930–1.660	13.7 8.0–20.0	6.74 6.61–6.92	39.70 35.52–45.9	0.148 0.050–0.280	5.46 1.37–33.17	0.170 0.120–0.200	218 177–261	0.0754 0.0120–0.4100	2.17 0.00–5.00
2024	1.245 0.740–1.530	11.8 6.0–19.0	7.05 6.58–7.44	37.71 33.44–43.6	0.142 0.060–0.260	1.72 0.42–3.58	0.163 0.120–0.290	231 183–265	0.2528 0.0240–1.1900	1.08 0.00–4.00
2025	1.242 0.900–1.680	10.3 8.0–14.0	7.31 7.09–7.60	35.12 31.33–41.8	0.124 0.070–0.220	1.01 0.22–2.12	0.135 0.050–0.180	236 178–271	0.0493 0.0230–0.0730	0.58 0.00–3.00

Сезонний аналіз виявив тенденцію до підвищення каламутності у весняно-літній та осінній час, що обумовлено паводковими явищами та інтенсифікацією поверхневого стоку з урбанізованої і сільськогосподарської території водозбору р. Тетерів [1] (рис. 1).

Забарвленість. Середньорічні значення забарвленості протягом 2020–2025 рр. не перевищували жорсткого нормативу (20 градусів). Мінімальне середньорічне значення зафіксовано у 2025 р. (10,3 градуси), максимальне – у 2023 р. (13,7 градуси). Окремі помісячні значення перевищували жорсткий норматив: у серпні 2020 р. (24 градуси), липні та серпні 2021 р. (25 та 24 градуси відповідно). Ці епізоди пов'язані з підвищенням вмісту органічних речовин гумусового походження у воді р. Тетерів у літній та ранньоосінній період (рис. 1).

Водневий показник (рН) протягом 2020–2025 рр. загалом відповідало нормативному діапазону 6,5–8,5. Мінімальне середньорічне значення спостерігалось у 2023 р. (6,74), а максимальне – у 2025 р. (7,31). Окремі помісячні значення наближались до нижньої межі нормативного діапазону: у травні 2024 р. рН склав 6,58. Нижчі значення у 2020–2023 рр. порівняно з 2024–2025 рр. пов'язані з підвищенням вмістом органічних речовин та посиленням мікробіологічних процесів у водоймі-джерелі в теплий сезон (рис. 2).

Хлориди. Концентрація хлоридів у питній воді м. Житомир демонструє виразну позитивну тенденцію до зниження протягом 2020–2025 рр.: від середньорічного значення 44,84 мг/дм³ у 2020 р. до 35,12 мг/дм³ у 2025 р., тобто зниження на 21,7%. Слід відзначити аномально високі значення у 2020–2021 рр., коли помісячні максимуми сягали 61,49 мг/дм³ (листопад 2020 р.) і 60,11 мг/дм³ (лютий 2021 р.). Нормативне значення (250 мг/дм³) не перевищувалось жодного разу. Позитивна тенденція до зниження хлоридів, ймовірно, пов'язана зі змінами у складі водозабору

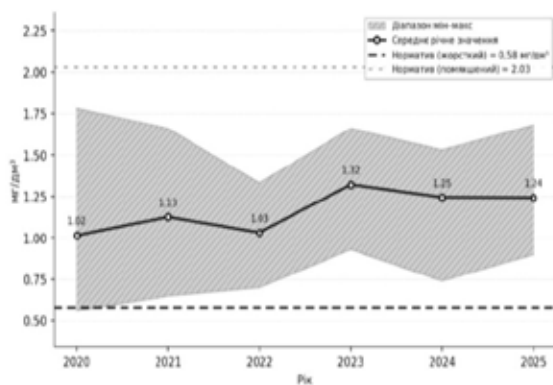
та коригуванням технологічного процесу водопідготовки (рис. 2).

Амоній-іони та нітрати. Концентрація амоній-іонів протягом 2020–2025 рр. не перевищувала нормативних значень (менше або рівне 0,5 мг/дм³), коливаючись у середньорічному вимірі від 0,063 мг/дм³ (2022 р.) до 0,148 мг/дм³ (2023 р.) (рис. 3). Нітрати залишались значно нижче нормативу (менше або рівне 50 мг/дм³) у всі роки, за виключенням аномального значення 33,17 мг/дм³ у травні 2023 р. (рис. 3). Природа цього аномального значення потребує додаткового дослідження – воно може бути пов'язане з короточасним антропогенним впливом або є наслідком технічної похибки вимірювання.

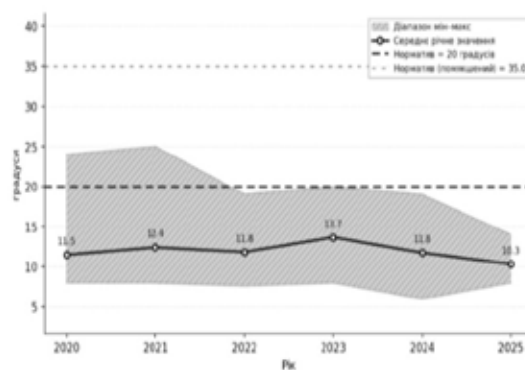
Залізо загальне не перевищувало жорсткого нормативу (0,2 мг/дм³) у середньорічному вимірі впродовж усього досліджуваного періоду. Мінімальні середньорічні концентрації зафіксовані у 2020 р. (0,088 мг/дм³), максимальні – у 2023 р. (0,170 мг/дм³). Окремі помісячні значення наближались до граничних: 0,29 мг/дм³ у березні 2024 р. та 0,20 мг/дм³ у кількох місяцях 2023 р. Підвищення концентрації заліза навесні обумовлено паводковими явищами, що вносять органічні комплекси заліза з поверхневим стоком з торфовмісних та лісових ґрунтів водозбору [12] (рис. 4).

Сухий залишок. Мінералізація питної води (сухий залишок) протягом 2020–2025 рр. знаходилась у межах норми (менше або рівне 1000 мг/дм³). Найвищі середньорічні значення зафіксовано у 2021 р. (262,8 мг/дм³), що зумовлено аномально високими значеннями окремих місяців: 354 мг/дм³ у лютому та 324 мг/дм³ у березні 2021 р. Мінімальне середньорічне значення зафіксовано у 2023 р. (218,5 мг/дм³). У 2023–2025 рр. спостерігається стабілізація показника в діапазоні 218,5–235,9 мг/дм³ (рис. 4).

Марганець. Марганець є найбільш проблемним показником якості питної води в системі водо-

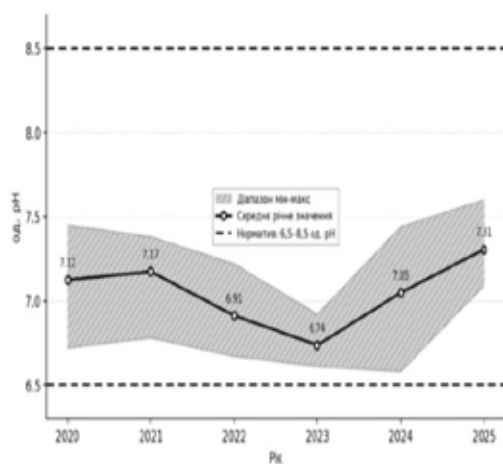


Каламутність питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

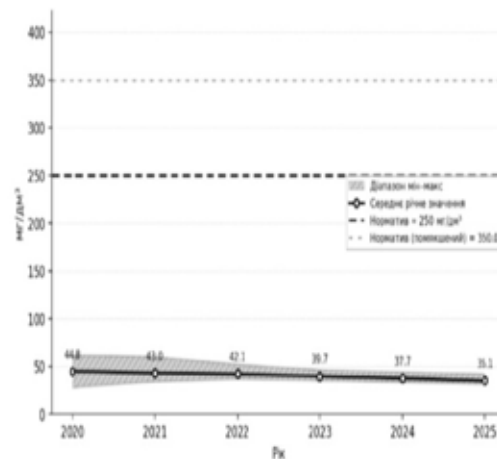


Забарвленість питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

Рис. 1. Динаміка каламутності та забарвленості питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

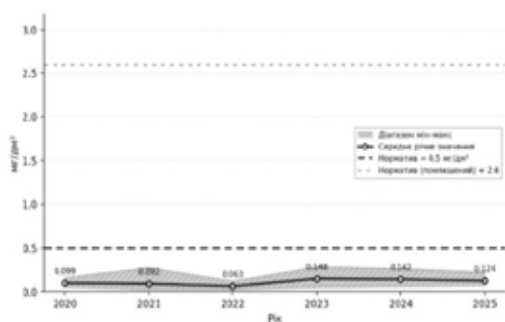


Водневий показник (pH) питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

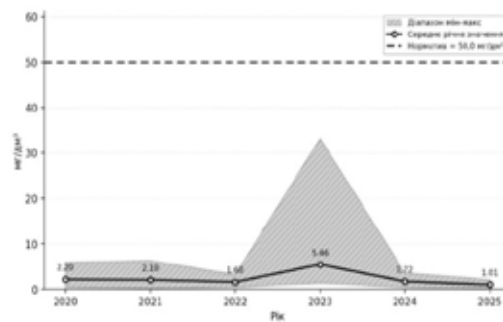


Концентрація хлоридів у питній воді м. Житомир (2020–2025 рр.)

Рис. 2. Водневий показник (pH) питної води та концентрація хлоридів у питній воді м. Житомир (2020–2025 рр.)

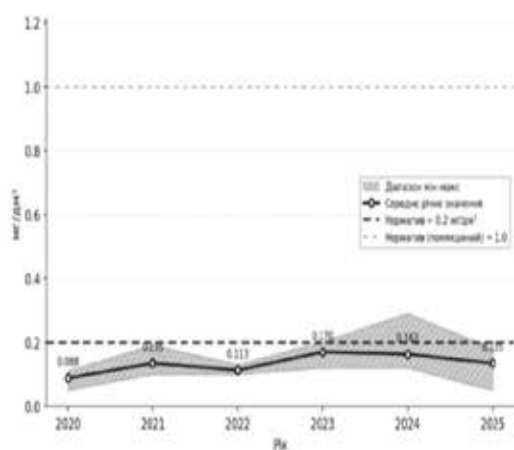


Концентрація амоній-іонів у питній воді м. Житомир (2020–2025 рр.)

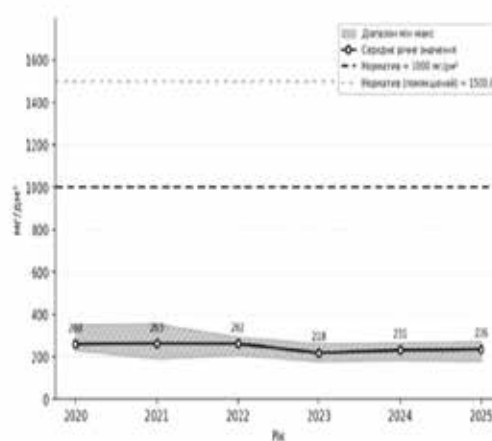


Концентрація нітратів у питній воді м. Житомир (2020–2025 рр.)

Рис. 3. Концентрація амоній-іонів та нітратів у питній воді м. Житомир (2020–2025 рр.)



Концентрація заліза загального у питній воді м. Житомир (2020–2025 рр.)



Сухий залишок питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

Рис. 4. Концентрація заліза загального у питній воді та сухого залишку питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

постачання м. Житомир за досліджуваний період. Виявлено чітку сезонну закономірність: щороку у червні та вересні концентрація марганцю суттєво зростає та перевищує жорсткий норматив ($0,05 \text{ мг/дм}^3$). Середньорічна концентрація варіювала від $0,044 \text{ мг/дм}^3$ (2020 р.) до $0,253 \text{ мг/дм}^3$ (2024 р.), при цьому спостерігається загальна тенденція до зростання проблеми у 2021–2024 рр. з подальшим зниженням у 2025 р. до $0,049 \text{ мг/дм}^3$. Найкритичніші ситуації зафіксовано у двох роках: у липні 2021 р. ($0,723 \text{ мг/дм}^3$) та у червні та серпні 2024 р. (максимум $1,190 \text{ мг/дм}^3$ у липні), коли значення перевищували пом'якшений норматив ($0,5 \text{ мг/дм}^3$). Перевищення пом'якшеного нормативу у 2024 р. тривало три місяці поспіль найдовший критичний епізод за весь аналізований період. Підвищення концентрації марганцю в літній та ранньоосінній час зумовлене підвищенням температури води, зниженням рівня розчиненого кисню та активізацією відновних процесів у придонних шарах водосховища [7, 12] (рис. 5).

Загальне мікробне число (ЗМЧ) протягом усього досліджуваного періоду залишалось у межах нормативних значень (менше або рівне 50 КУО/см^3). Середньорічні значення ЗМЧ демонструють виразну позитивну тенденцію до зниження: від $2,67 \text{ КУО/см}^3$ у 2020 р. до $0,58 \text{ КУО/см}^3$ у 2025 р. – зменшення у 4,6 рази за шість років. Патогенна мікрофлора (загальні коліформи, ентерококи, коліфаги) не виявлялась жодного разу протягом усього аналізованого шестирічного періоду. Це свідчить про стабільно високу ефективність процесів знезараження питної води та надійну санітарно-мікробіологічну безпеку системи водопостачання м. Житомир (рис. 5).

Головні висновки. Якість питної води у системі централізованого водопостачання м. Житомир за 2020–2025 рр. в цілому відповідає нормативним вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10. Жоден із 10 аналізованих показників не перевищував пом'якшених нормативних значень у середньорічному вимірі, мікробіологічні параметри відповідали нормам протягом усього досліджуваного періоду.

Каламутність є стабільним проблемним показником, жорсткий норматив ($0,58 \text{ мг/дм}^3$) перевищувався щомісячно впродовж усього аналізованого періоду, однак пом'якшений норматив ($2,03 \text{ мг/дм}^3$) жодного разу не досягався. Середньорічні значення коливались від $1,016 \text{ мг/дм}^3$ (2020 р.) до $1,321 \text{ мг/дм}^3$ (2023 р.).

Марганець є пріоритетним показником, виявлено стійку щорічну сезонну закономірність підвищення концентрацій у червні–вересні з перевищенням пом'якшеного нормативу ($0,5 \text{ мг/дм}^3$) у 2021 р. ($0,723 \text{ мг/дм}^3$) та 2024 р. (максимум $1,190 \text{ мг/дм}^3$ у липні), що свідчить про недостатню ефективність технології деманганізації в літній період.

Зафіксовано чіткі позитивні тенденції, а саме стійке зниження концентрації хлоридів (мінус 21,7% за шість років) та суттєве покращення мікробіологічних показників (ЗМЧ знизилось у 4,6 рази з $2,67 \text{ КУО/см}^3$ у 2020 р. до $0,58 \text{ КУО/см}^3$ у 2025 р.).

Аномально високе значення нітратів ($33,17 \text{ мг/дм}^3$) у травні 2023 р. вимагає окремого дослідження; найімовірнішою причиною є короткочасний поверхневий злив агрохімікатів у паводковий період.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження обґрунтовують необхідність модернізації технології деманганізації та знезалізнення на станції водопідготовки КП «Житомирводоканал», зокрема шляхом впровадження каталітичного фільтрування. Встановлено доцільність посилення частоти відбору проб і моніторингу вмісту марганцю у червні–вересні. Отримані дані також свідчать про потребу проведення додаткових досліджень для встановлення причин аномально високих значень нітратів (травень 2023 р.) та хлоридів (2020–2021 рр.). Перспективним напрямом є розширення переліку досліджуваних показників із включенням важких металів у різних формах, що дозволить більш повно оцінити екологічний ризик для водозабору. Отримані результати можуть бути використані іншими підприємствами водопостачання Поліського регіону для науково обґрунтованого планування водоохоронних заходів.

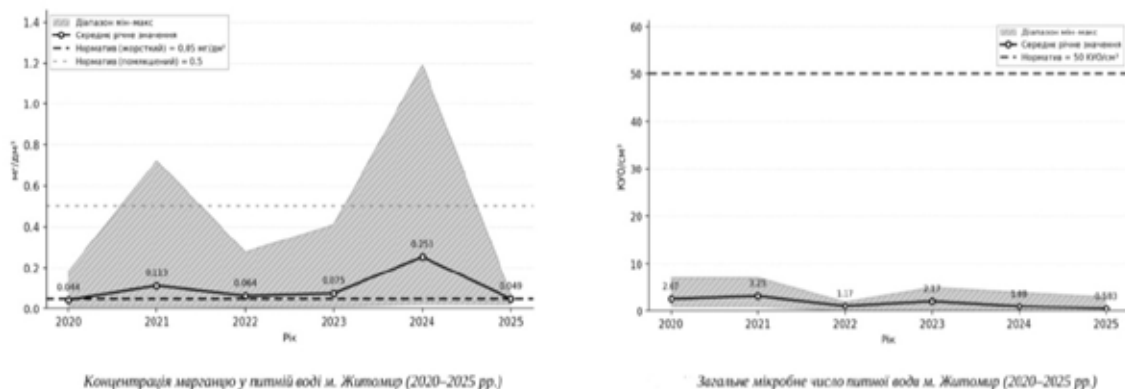


Рис. 5. Концентрація марганцю у питній воді та загального мікробного числа питної води м. Житомир (2020–2025 рр.)

Література

1. Teteriv River. Wikipedia: website. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Teteriv> (дата звернення: 09.04.2026).
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962 (дата звернення: 11.04.2026).
3. Didovets I., Lobanova A., Bronstert A., Snizhko S., Maule C.F., Krysanova V. Assessment of climate change impacts on water resources in three representative Ukrainian catchments using ecohydrological modelling. *Water*. 2017. Vol. 9, № 3. P. 204. DOI: 10.3390/w9030204.
4. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 р. / Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2023. 358 с. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sferakomunalnykh-posluh/tsentralizovane-vodopostachannia-ta-vodovidvedennia/natsionalna-dopovid-pro-iakist-pytnoi-vody-ta-stan-pytneho-vodopostachannia-v-ukraini> (дата звернення: 10.04.2026).
5. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 р. / Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2024. 419 с. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sferakomunalnykh-posluh/tsentralizovane-vodopostachannia-ta-vodovidvedennia/natsionalna-dopovid-pro-iakist-pytnoi-vody-ta-stan-pytneho-vodopostachannia-v-ukraini> (дата звернення: 12.04.2026).
6. Якість води: протоколи вимірювань показників якості питної води за 2020–2025 рр. КП «Житомирводоканал» : офіційний сайт. URL: <https://vodokanal.zt.ua/spozivacam/akist-vodi> (дата звернення: 11.04.2026).
7. Kireitseva H. V., Tsyhanenko-Dziubenko I. Y., Herasymchuk O. L., Skyba H. V., Khomenko S. V. Forecasting the hydroecological status of the Teteriv River using a modified Streeter-Phelps model. *ResearchGate*. 2025. URL: <https://www.researchgate.net/publication/394938758> (дата звернення: 10.04.2026).
8. Питна вода України: медико-екологічні та санітарно-гігієнічні аспекти / В. О. Прокопов ; за ред. А. М. Сердюка. Київ : ВСВ «Медицина», 2016. 400 с.
9. Goncharuk V. V. *Drinking Water. Physics, Chemistry, and Biology*. Cham : Springer, 2014. 602 p.
10. Чегус В. В. Оцінка якості води р. Тетерів як питного водозабору м. Житомир : кваліфікаційна робота магістра зі спеціальності 101 – Екологія / Поліський національний університет. Житомир, 2020. 41 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/10683/1/Chesus_VV_KR_101_2020.pdf (дата звернення: 11.04.2026).
11. ДСанПіН 2.2.4-171-10 : Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною : затв. наказом МОЗ України від 12.05.2010 № 400. Київ, 2010. 45 с.
12. Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н. А., Астрелін І. М. та ін. Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод. Київ : Лібра, 2000. 552 с.

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ГЕОСИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ОХОРОНИ РІЧКОВИХ ЕКОСИСТЕМ: ТЕХНОЛОГІЇ ВИЯВЛЕННЯ ТА МІНІМІЗАЦІЇ НЕГАТИВНИХ ВПЛИВІВ

Залізняк Я.І.

Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20301, м. Умань
yana.bezusyak@gmail.com

У статті обґрунтовано теоретико-методологічні засади та практичні аспекти застосування геосистемного підходу до охорони річкових екосистем в умовах наростаючого антропогенного тиску техногенного походження. Розглянуто ключову методологічну проблему визначення меж геоєкології як самостійної дисципліни, яка інтегрує екологічний підхід у географічні дослідження для встановлення лімітів господарського освоєння ландшафтів. Обґрунтовано доцільність дослідження річкового басейну як цілісного об'єкта, що функціонує у вигляді складної природно-господарської та геотехнічної системи, де природні компоненти зазнають деструктивного впливу з боку технічного блоку (промислових, комунальних та агротехногенних джерел). Запропоновано комплексну систему методологічних установок, що поєднує соціоекологічний, системний, факторний, ландшафтний та позиційний аналізи, а також алгоритм послідовного картографічного моделювання (від базових і спеціальних гідрохімічних карт до оцінювальних моделей екологічного ризику) з метою оптимізації екологічного управління водними ресурсами.

Практичну частину дослідження реалізовано шляхом комплексного моніторингу гідрохімічного стану поверхневих вод басейну річки Південний Буг протягом гідрологічних циклів 2024–2025 років. Проаналізовано просторово-часову варіативність сезонних концентрацій заліза (Fe), мангану (Mn) та купруму (Cu) у ключових пунктах спостереження: містах Хмільник, Вінниця, Ладижин та села Ставки. За результатами аналізу експериментальних даних та їх лінійно-графічної візуалізації ідентифіковано чітку сезонну амплітуду міграції мікроелементів та визначено критичні періоди дестабілізації гомеостазу річки. Встановлено, що екологічний мінімум вмісту металів формується у літню межень завдяки зниженню поверхневого змиву та активізації біотичних процесів самоочищення. Натомість виявлено два піки максимального екологічного ризику: весняний, зумовлений ландшафтно-диференційованим поверхневим стоком та вимиванням акумульованих сполук із прибережних смуг і сільськогосподарських угідь, та зимовий, викликаний концентруванням стабільних промислово-комунальних скидів у період низької водності та переходу річки на підземне живлення.

Доведено обмеженість природної здатності системи до саморегуляції, що зумовлює необхідність коригування графіків контролю скидів Басейновим управлінням водних ресурсів річки Південний Буг. Запропоновано наукове підґрунтя для інженерно-екологічного проектування локальних очисних споруд і створення штучних біоплато у прибережних захисних смугах міських агломерацій. Важливим складником роботи є висвітлення перспектив впровадження отриманих результатів та графічних моделей у вищу освіту для здобувачів спеціальностей «Екологія» та «Науки про Землю». Матеріали моніторингу інтегруються як наскрізні практичні кейси у лабораторні заняття з низки фахових дисциплін (зокрема, «Гідроєкологія», «Моніторинг довкілля» та «Водоохоронні комплекси з основами гідрології») та використовуються для розробки інноваційної тематики самостійних студентських робіт у межах методу проєктів, що забезпечує формування суб'єктної відповідальності майбутніх фахівців. *Ключові слова:* геосистемний підхід, геоєкологія, ландшафтно-технічна система, екологічний ризик, мікроелементи, Південний Буг.

Geosystem-Based Approach to River Ecosystem Conservation: Technologies for Identifying and Minimizing Anthropogenic Impacts. Zalizniak Ya.

The article substantiates the theoretical and methodological foundations and practical aspects of applying the geosystem approach to the protection of river ecosystems under the conditions of growing anthropogenic pressure of technogenic origin. It addresses a key methodological problem of defining the boundaries of geoecology as an independent discipline that integrates the ecological approach into geographical research to establish limits for the economic development of landscapes. The expediency of studying a river basin as a holistic object functioning as a complex natural-economic and geotechnical system is justified, where natural components are subject to destructive impacts from the technical block (industrial, municipal, and agro-technogenic sources). A comprehensive framework of methodological approaches is proposed, combining socio-ecological, systemic, factor, landscape, and positional analyses, alongside an algorithm for sequential cartographic modeling (ranging from basic and specialized hydrochemical maps to environmental risk assessment models) to optimize environmental water resource management.

The practical part of the research was implemented through comprehensive monitoring of the hydrochemical state of surface waters in the Southern Bug River basin during the 2024–2025 hydrological cycles. The spatiotemporal variability of seasonal concentrations of iron (Fe), manganese (Mn), and copper (Cu) was analyzed at key monitoring stations: the towns/cities of Khmilnyk, Vinnytsia, Ladyzhyn, and the village of Stavky. Based on the analysis of experimental data and their linear-graphic visualization, a clear seasonal amplitude of trace element migration was identified, and critical periods of river homeostasis destabilization were determined. It was



established that the environmental minimum of metal content forms during the summer low-flow period due to reduced surface runoff and the activation of biotic self-purification processes. Conversely, two peaks of maximum environmental risk were identified: the spring peak, caused by landscape-differentiated surface runoff and the leaching of accumulated compounds from riparian zones and agricultural lands; and the winter peak, caused by the concentration of stable industrial and municipal discharges during low-water periods and the river's transition to groundwater supply.

The study proves the limitations of the system's natural capacity for self-regulation, which necessitates adjusting discharge control schedules by the Basin River Department of Water Resources of the Southern Bug River. A scientific basis is proposed for the environmental engineering design of local wastewater treatment plants and the creation of constructed wetlands (artificial bioplato) in the riparian protection zones of urban agglomerations. An important component of the work is highlighting the prospects of integrating the obtained results and graphic models into higher education for students majoring in «Ecology» and «Earth Sciences». The monitoring materials are integrated as cross-cutting practical case studies into laboratory classes for a number of specialized disciplines (specifically, «Hydroecology», «Environmental Monitoring», and «Water Conservation Complexes with Foundations of Hydrology») and are used to develop innovative topics for independent student work within the project-based learning method, which ensures the formation of subject responsibility in future specialists. *Key words:* geosystem approach, geocology, landscape-technical system, environmental risk, trace elements, Southern Bug.

Постановка проблеми. Стрімка екологізація сучасної науки зумовила появу нових міждисциплінарних напрямів на стику географії та екології. Формування геоєкології як самостійної дисципліни супроводжується гострими дискусіями щодо її цілей, завдань та змістовного наповнення. Ключова методологічна проблема полягає у чіткому визначенні її головної мети, яка інтегрує екологічний підхід у дослідження географічного середовища для встановлення екологічних меж та нормативів його господарського освоєння. На відміну від класичної біоцентричної екології, геоєкологія охоплює значно ширший спектр природних і техногенних компонентів, розглядаючи системну взаємодію суспільства, виробництва та ландшафту. Саме цей комплексний підхід забезпечує їй переваги у розробленні дієвих шляхів розв'язання глобальних та регіональних екологічних криз [1].

Геоєкологія органічно поєднує просторову диференціацію територій, властиву географічним наукам, з екологічними принципами охорони та оптимізації довкілля. Практичне застосування геоєкологічних досліджень полягає в оцінці придатності геоєкосистем для конкретних видів природокористування. Проте тут постає інша фундаментальна проблема – відсутність уніфікованих провідних критеріїв для оцінки негативних наслідків антропогенного навантаження. Загроза незворотних змін у природному середовищі та активізація небезпечних процесів під впливом потужних технічних засобів вимагають негайного розроблення інноваційних методів моніторингу, прогнозування та моделювання.

Особливо гостро ця проблема виявляється під час дослідження річкових геосистем, які є найбільш динамічними та вразливими до антропогенного тиску елементами ландшафту. Сучасний стан річок України вимагає переходу від констатації фактів забруднення до впровадження високотехнологічних рішень для виявлення деструктивних процесів на ранніх стадіях та мінімізації їхніх наслідків.

У науковій літературі сутність методу проєктів та його практичне тлумачення розглядаються переважно в контексті впровадження новітніх органі-

заційних форм і технологій навчання. Цей підхід виступає дієвим засобом формування ключових професійних якостей та ціннісних характеристик майбутніх спеціалістів [2]. Застосування проєктних методів дозволяє студентам ефективно опанувати навички самостійної дослідницької діяльності, розвиває у них суб'єктну відповідальність за результати власної праці, що є критично важливим для якісної підготовки майбутніх фахівців до реальної природоохоронної та екологічної роботи [3].

Усвідомлення суспільством відповідальності за вирішення цих завдань актуалізує потребу в якісній трансформації вищої екологічної та географічної освіти в Україні. Необхідно здійснити модернізацію навчального процесу, розробити й упровадити новітні методи та підходи із залученням передового світового досвіду та технологій [4].

Актуальність дослідження. Сучасні геоєкологічні дослідження є фундаментальним підґрунтям для розробки стратегій раціонального природокористування, забезпечення сталого розвитку суспільства та гармонізації антропогенної діяльності з динамічними процесами навколишнього середовища. У межах цього наукового напрямку особливої актуальності набуває вивчення складних природно-антропогенних комплексів – геосистем. Однак, незважаючи на загальне визнання важливості геоєкології, її методологічний апарат залишається дискусійним: наукова література характеризує термін «геоєкологія» як категорію «вільного користування», що відображає різноманітність авторських трактувань об'єкта та предмета досліджень [5].

Така багатогранність підходів є особливо помітною під час аналізу річкових екосистем. Річка, як ключовий елемент ландшафту, функціонує як складна геосистема, де гідрологічні, біологічні та геологічні компоненти перебувають у стані постійної взаємодії. В умовах посилення антропогенного тиску – від зміни русел до забруднення стічними водами – річкові геосистеми втрачають здатність до саморегуляції. Тому перехід від фрагментарного вивчення окремих компонентів до системного аналізу вимагає чіткого визначення методологічних меж геоєкології [6].

У даній роботі ми розглядаємо річкову геосистему як цілісний об'єкт дослідження, що дозволяє не лише ідентифікувати джерела деградації, а й обґрунтувати ефективні технологічні рішення для мінімізації негативних впливів та відновлення екологічної рівноваги.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Під час аналізу попередніх наукових доробок було детально розглянуто праці, присвячені інтеграції екологічного підходу в систему географічних досліджень. Варто констатувати, що й до сьогодні у науковій спільноті тривають дискусії стосовно змістовної сутності, фундаментальних цілей, ключових завдань та предметного наповнення геоекології. Теоретико-методологічні засади геоекології та гідрології, а також специфіка застосування її методів у дослідницькій та освітній практиці детально висвітлені у працях відомих українських науковців, зокрема М. Д. Гродзинського [2, 3], В. К. Хільчевського [7], С. П. Романчука [8] та інших вітчизняних і закордонних дослідників [9-11].

Зокрема, у дослідженні [9] геоекологію визначено як міждисциплінарну науку, спрямовану на вивчення незворотних процесів і явищ у навколишньому середовищі, зумовлених надмірним антропогенним тиском. Водночас у праці [8] її розглядають як самостійну галузь географічних наук, що охоплює широкий спектр питань щодо оптимізації взаємодії суспільства та природи. Інший вектор тлумачення представлено у дослідженні [11], де геоекологія характеризується як глобальний науковий напрям, який вивчає особливості функціонування всієї екосфери в процесі її безпосередньої взаємодії із соціумом.

Невирішені частини загальної проблеми. Більшість сучасних досліджень річкових басейнів мають фрагментарний характер і зосереджені виключно на констатації фактів хімічного забруднення, поза увагою комплексного ландшафтно-позиційного аналізу. Досі відсутні уніфіковані критерії оцінки екологічного ризику, які б пов'язували сезонну гідродинаміку річки з інтенсивністю тиску конкретних господарських об'єктів у межах геотехнічної системи.

Новизна. Незважаючи на значну кількість геоекологічних праць, присвячених охороні водних ресурсів, невирішеними залишаються питання комплексного застосування геосистемного підходу для оцінки гомеостазу річкових екосистем у межах сучасних ландшафтно-технічних трансформацій. Недостатньо даних щодо поєднання теоретико-методологічних установок соціоекологічного, факторного й позиційного аналізів із практичним моніторингом сезонної міграції мікроелементів (заліза, мангану, купруму) у водному середовищі басейну річки Південний Буг. Досі слабо висвітленими є закономірності формування періодів максимального екологічного ризику в умовах сезонних змін

гідрологічного режиму річкових геосистем, а також інтеграція цих даних. Саме ці питання комплексно висвітлено у поданій статті.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічний апарат геоекологічного аналізу річкових екосистем базується на комплексному поєднанні загальнонаукових принципів, просторових методів географії та інструментарію прикладних екологічних наук. Для досягнення мети дослідження сформовано систему взаємопов'язаних методологічних установок [12]:

1. Гуманітарно-екологічний та соціоекологічний підходи – визначають пріоритетність збереження безпечного та збалансованого природного середовища для життєдіяльності людини, встановлюючи жорсткі екологічні обмеження на господарське освоєння прибережних зон.

2. Системний підхід – розглядає річковий басейн як цілісну екосистему. Це дозволяє розкрити різноманіття зв'язків між ландшафтними компонентами та об'єднати різноманітні гідродинамічні, геологічні й біологічні елементи в єдину картину.

3. Концепція складних систем («господар – середовище») – виокремлює у структурі басейну дві ключові підсистеми: водокористувача (промисловість, агросфера, ЖКГ) та безпосередньо річкову геосистему, що реагує на антропогенний тиск.

4. Функціональний (факторний) підхід – базується на математико-статистичному апараті та факторному аналізі. Він дає змогу оцінити поточний стан компонентів річки та визначити масштаб деструктивного впливу окремих чинників забруднення.

5. Ландшафтний підхід – забезпечує вивчення взаємозумовленості та зв'язків між природно-територіальними комплексами (ПТК) заплав, водозборів та русловими процесами.

6. Структурно-морфологічний та позиційний аналіз – спрямовані на фіксацію просторового положення річкової системи відносно природних та антропогенних потоків речовини й енергії (трансформація русла, акумуляція забруднюючих речовин у донних відкладах) [115].

В Україні тривалий час існувало відомче розмежування об'єктів дослідження, через що регіональні плани розвитку часто обмежувалися лише соціально-економічними показниками без належного врахування гідрогенних та геоекологічних ризиків [9]. Для подолання цієї проблеми екологічне управління та прогнозування стану річкових геосистем у даній роботі реалізується через послідовне картографічне моделювання, яке охоплює такі етапи:

1. Складання базових карт: інтеграція геологічних даних, характеристик гідродинамічних процесів річкового басейну та геохімічного розподілу елементів у прибережних ґрунтах.

2. Розробка спеціальних карт: фіксація гідрогеологічних умов, режиму, фізико-хімічних та гідрохі-

мічних властивостей поверхневих і зв'язаних з ними підземних вод.

3. Формування оцінювальних карт: виділення прибережних захисних смуг, заповідних об'єктів, а також зон інтенсивного водозабору та скиду стічних вод.

4. Картографування потенційного природокористування з точки зору геопотенціалу: наукове обґрунтування розміщення господарських об'єктів у межах басейну з урахуванням екологічних обмежень річкової екосистеми [13].

Завершальним етапом запропонованої методики є побудова карт екологічного ризику, які дають чітке уявлення про характер і просторове поширення негативних процесів (забруднення, замулення, деградація русла), що виникають внаслідок техногенної діяльності. На основі цих моделей формуються варіанти прогнозних сценаріїв, що дозволяє обрати найбільш оптимальні технологічні рішення для мінімізації негативного впливу та ефективного екологічного управління річковими геосистемами в цілому [14].

Виклад основного матеріалу. Аналіз динаміки вмісту мікроелементів у басейні р. Південний Буг дає змогу розглядати досліджувані водні об'єкти як складні природно-господарські геосистеми. Втручання людини та інтенсивне водокористування трансформують природно-територіальні комплекси, перетворюючи їх на геотехнічні системи. Такі ландшафтно-технічні системи функціонують як блокові структури, де природні блоки (гідрологічні та гідрохімічні показники річки) перебувають під постійним тиском технічного блоку (промислові скиди, комунальні стічні води, агротехногенний змив).

Взаємодія елементів у межах тріади «природа – господарство – суспільство» чітко простежується через сезонну та просторову варіативність концентрацій заліза (Fe), мангану (Mn) та купруму (Cu). За результатами моніторингу екологічного стану річкових вод за період 2024–2025 рр. встановлено, що технічний блок системи суттєво деформує природну геохімічну структуру басейну.

Для наочної оцінки функціонування геосистеми та виявлення зон найбільшого антропогенного навантаження було проаналізовано ключові пункти спостереження на р. Південний Буг (м. Хмільник, м. Вінниця, м. Ладижин та с. Ставки) у різні гідрологічні сезони.

Практична реалізація запропонованого геосистемного підходу та оцінка поточного стану

річкових екосистем вимагає детального аналізу гідрохімічних параметрів водної товщі. Оскільки річковий басейн функціонує як транзитно-аккумулятивна система, динаміка вмісту мікроелементів є прямим віддзеркаленням активності технічного блоку геосистеми та його тиску на природне середовище.

У межах проведення комплексного екологічного моніторингу басейну р. Південний Буг було здійснено детальний аналіз сезонних коливань концентрацій пріоритетних мікроелементів – заліза (Fe), мангану (Mn) та купруму (Cu). Узагальнені результати натурних досліджень та лабораторних аналізів, проведених протягом гідрологічних циклів 2024–2025 рр., дозволили зафіксувати чітку сезонну амплітуду міграції металів (табл. 1).

Для виявлення прихованих закономірностей у функціонуванні досліджуваної геосистеми річки Південний Буг, отримані дані було візуалізовано. Графічний аналіз дозволяє наочно оцінити періоди екологічного ризику, коли антропогенне навантаження у поєднанні з природними кліматичними факторами призводить до максимального накопичення мікроелементів у водних ресурсах (рис. 1).

Комплексний аналіз представлених моніторингових даних (табл. 1) та графіка (рис. 1) дозволяє ідентифікувати чіткі просторово-часові закономірності міграції та акумуляції мікроелементів у геосистемі річки Південний Буг впродовж 2024–2025 років. Динаміка концентрацій заліза (Fe), мангану (Mn) та купруму (Cu) демонструє синхронну циклічність, яка жорстко підпорядкована зміні гідрологічних сезонів року та інтенсивності антропогенного тиску на водозбірну площу.

Загальною закономірністю для всіх досліджуваних металів є формування екологічного мінімуму в літній період, коли концентрації падають до найнижчих значень року: Fe – 0,23 мг/дм³, Mn – 0,17 мг/дм³, Cu – 0,13 мг/дм³. З позицій ландшафтно-екологічного аналізу це пояснюється двома ключовими факторами природного блоку геосистеми: по-перше, істотним зниженням поверхневого змиву з території басейну в умовах літньої межени; по-друге, інтенсифікацією процесів самоочищення річки (активне поглинання мікроелементів фітопланктоном, вищою водною рослинністю та перехід металів у нерозчинні форми з подальшим осадженням у донні відклади).

Таблиця 1

Сезонна динаміка середніх концентрацій заліза (Fe), мангану (Mn) та купруму (Cu) у річкових водах басейну р. Південний Буг (за період 2024–2025 рр.), мг/дм³

Хімічний елемент	Весна	Літо	Осень	Зима
Fe	0,28	0,23	0,26	0,29
Mn	0,20	0,17	0,20	0,21
Cu	0,15	0,13	0,16	0,17

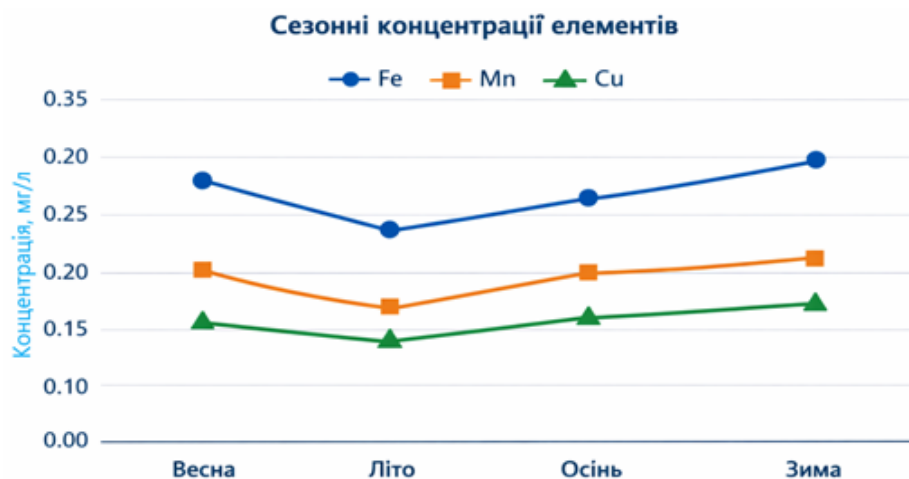


Рис. 1. Сезонний розподіл концентрацій Fe, Mn та Cu за результатами геоecологічних досліджень

Натомість періоди максимального екологічного ризику та дестабілізації гомеостазу річкової екосистеми припадають на весняний та зимовий гідрологічні сезони.

Весняний екологічний ризик (фактор поверхневого стоку): навесні спостерігається різке зростання вмісту елементів Fe – 0,28 мг/дм³, Mn – 0,20 мг/дм³, Cu – 0,15 мг/дм³. У цей період провідну роль відіграє ландшафтно-диференційований змив речовини. Танення снігу та весняні зливи призводять до масштабного вимивання акумульованих залізо-манганових та купрум вмісних сполук із техногенно навантажених прибережних захисних смуг, сільськогосподарських угідь (де застосовуються купрум вмісні фунгіциди) та урбанізованих територій. Річкова система в цей час функціонує як потужний транзитний коридор для забруднюючих речовин.

Зимовий екологічний ризик (фактор підземного живлення та концентрування): абсолютні максимуми концентрацій для всіх трьох металів зафіксовані під час зимової межні (Fe – 0,29 мг/дм³, Mn – 0,21 мг/дм³, Cu – 0,17 мг/дм³). Таке явище є критичним індикатором функціонування геотехнічної системи. За умов низької водності та відсутності розбавляючого ефекту поверхневих вод, стабільні технологічні та комунально-побутові скиди стічних вод міських агломерацій починають відігравати визначальну роль. Додатковим чинником виступає специфіка зимового живлення річки переважно за рахунок підземних вод, які природно збагачені залізом та манганом через відновний характер геохімічного середовища в надрах басейну Південного Бугу.

В осінній період відзначається проміжне відновлення концентрацій (Fe – 0,26 мг/дм³, Mn – 0,20 мг/дм³, Cu – 0,16 мг/дм³). Це пов'язано з початком осіннього паводкового режиму, відмиранням вищої водної флори (що супроводжується вторинним забрудненням товщі води через релізування металів із біомаси), а також посиленням вертикального пере-

мішування водних мас, яке піднімає замулені депоновані метали з дна річки.

Висновки. Отримані табличні та графічні результати підтверджують, що природна здатність річкової геосистеми до саморегуляції є обмеженою. Стабільно високий рівень вмісту заліза, мангану та купруму протягом року свідчить про хронічне антропогенне перевантаження басейну. Це обґрунтовує нагальну потребу впровадження інженерно-технологічних рішень для локалізації стоків саме у вузлових точках ризику (у зимовий та весняний періоди), зокрема через модернізацію очисних споруд та створення штучних біоплато у прибережних захисних смугах.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження мають вагомe прикладне значення та перспективу безпосереднього впровадження в освітній процес для здобувачів спеціальностей Е2 «Екологія» та Е4 «Науки про Землю». Конкретні матричні дані та графічні моделі екологічного ризику сезонної міграції металів будуть використані як наскрізні практичні кейси під час проведення лабораторних занять з дисциплін «Основи технологій захисту навколишнього середовища», «Гідроекологія», «Екологія водних ресурсів», «Водоохоронні комплекси з основами гідрології» та «Моніторинг довкілля», а також для розробки інноваційної тематики самостійних студентських робіт у межах методу проєктів.

У сфері екологічного менеджменту виявлені зимово-весняні піки концентрацій заліза, мангану й купруму можуть застосовуватися Басейновим управлінням водних ресурсів річки Південний Буг в м. Вінниця з метою корегування графіків контролю промислових і комунальних скидів. Крім того, сформовані масиви даних щодо динаміки полютантів є науковим підґрунтям для інженерно-екологічного проектування локальних очисних споруд та створення штучних біоплато в межах прибережних захисних смуг конкретних міських агломерацій, зокрема міст Хмільник, Вінниця та Ладижин.

Література

1. Денисик Г. І. Антропогенні ландшафти Правобережної України : монографія. Вінниця : Арбат, 1998. 292 с.
2. Гродзинський М. Д. Пізнання ландшафту: місце і простір : монографія. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2005. Т. 1. 431 с.
3. Гродзинський М. Д. Точки росту та напрямки розвитку українського ландшафтознавства. *Україна: географічні проблеми сталого розвитку* : зб. наук. праць : в 4-х т. Київ : ВГЛ «Обрії», 2004. Т. 1. С. 176–186.
4. Ковальов О. П. Ландшафт сам по собі та для людини : монографія. Харків : Бурун Книга, 2009. 928 с.
5. Круглов І. Екологія ландшафту (геоекологія): Аналіз європейських та північноамериканських публікацій. *Український географічний журнал*. 2000. № 2. С. 62–66.
6. Круглов І. Трансдисциплінарна геоекологія : монографія. Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 292 с.
7. Хільчевський В. К., Чунарьов О. В., Ромась М. І. Водні ресурси та якість річкових вод басейну Південного Бугу. Київ : Ніка-Центр, 2009. 184 с.
8. Романчук С. П. Історичне ландшафтознавство (теоретико-методологічні засади та методика антропогенно-ландшафтних реконструкцій давнього природокористування) : монографія. Київ, 1998. 146 с.
9. Сорокіна Л., Голубцов О., Рога І. Застосування басейнового підходу у дослідженні антропогенізованих ландшафтів. *Озера і штучні водойми України: сучасний стан і антропогенні зміни* : матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Луцьк, 22–24 трав. 2008 р.) / відп. ред. Ф. В. Зузук. Луцьк : РВВ «Вежа» Волин. нац. ун-ту ім. Лесі Українки, 2008. С. 189–193.
10. Удовиченко В. В. Методи комплексних географічних досліджень. Київ, 2009. 100 с.
11. Christopherson R. W. Geosystems: An Introduction to Physical Geography. Prentice Hall : Upper Saddle River, NJ, USA, 2014. 750 p.
12. Курлова З., Слободянюк Т., Руда В. Методика комплексних польових географічних досліджень (відділення наук про Землю) : навч.-метод. видання. Київ, 2018. 36 с.
13. Ковальчук І. П., Ковальчук А. І. Геоінформаційне атласне картографування річковобасейнових систем. *Геополітика і екогеодинаміка регіонів*. 2014. Том 10, вип. 1. С. 63–67.
14. Сташук В. Сучасний стан та перспективи розвитку управління водними ресурсами України. *Водне господарство України*. 2012. № 5. С. 5–9.

Дата першого надходження статті до видання: 29.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

РОЛЬ ПІДЗЕМНИХ ВОД У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ СТАЛОГО ВОДОКОРИСТУВАННЯ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

Новікова А.М.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків
novikovaan3010@gmail.com

Метою статті є аналіз сучасного стану водозабезпеченості Харківської області в контексті трансформації водогосподарського комплексу та кліматичної зміни. Однією з ключових особливостей водоресурсного потенціалу України є його виражена просторова диференціація. Забезпеченість територій поверхневими та підземними водами істотно варіюється між окремими регіонами країни, що обумовлено сукупною дією природно-географічних чинників. Визначальний вплив на формування регіональних відмінностей мають кліматичні особливості, геологічна структура, морфологія рельєфу, а також інтенсивність атмосферного зволоження, які спільно визначають умови накопичення, перерозподілу та відновлення водних ресурсів. Охарактеризовано структуру поверхневих і підземних водних ресурсів, а також особливості формування водного балансу Харківської області. Проаналізовано динаміку забору води за період 2014–2024 рр., що формує виявлення тенденції до подальшого зниження природної водності регіону під впливом аридизації клімату, підвищення температури повітря та деградації малих річок. Показано, що сучасна водогосподарська ситуація Харківської області характеризується поєднанням зменшення антропогенного навантаження на водні ресурси та одночасного зростання ризиків дефіциту води. Встановлено, що в умовах водного дефіциту саме підземні води можуть відігравати ключову роль у підвищенні стійкості системи водозабезпечення регіону. Для водних ресурсів властивий відносно рівномірний характер відновлення запасів, незначна чутливість до сезонної мінливості гідрологічних умов та підвищена стійкість до впливу зовнішніх джерел антропогенного забруднення. Обґрунтовано необхідність удосконалення системи управління водними ресурсами, модернізації інфраструктури водопостачання та впровадження природоорієнтованих підходів до збереження та відновлення водних. Ресурсів регіону. *Ключові слова:* водозабезпеченість, водні ресурси, Харківська область, забір води, підземні води, водокористування, водний дефіцит, водність, кліматичні зміни.

The Role of Groundwater in Ensuring Sustainable Water Use in the Kharkiv Region under Conditions of Water Resource Scarcity. Novikova A.

The purpose of this study is to assess the current state of water availability in the Kharkiv region within the context of the ongoing transformation of the water management sector and climate change. One of the defining characteristics of Ukraine's water resource potential is its pronounced spatial heterogeneity. The availability of surface and groundwater resources varies considerably across different regions of the country due to the combined influence of natural and geographical factors. Climatic conditions, geological structure, topographic features, and the intensity of atmospheric moisture are the principal determinants governing the accumulation, redistribution, and natural replenishment of water resources.

The study characterizes the composition of surface and groundwater resources and examines the specific features of water balance formation in the Kharkiv region. An analysis of water abstraction dynamics during the period 2014–2024 reveals a continuing trend toward declining regional water availability driven by climate aridization, increasing air temperatures, and the degradation of small river systems. The findings demonstrate that the current water management situation in the Kharkiv region is characterized by the simultaneous reduction of anthropogenic pressure on water resources and an increasing risk of water scarcity.

The study establishes that under conditions of growing water deficit, groundwater resources can play a pivotal role in enhancing the resilience of the regional water supply system. These resources exhibit relatively stable recharge patterns, limited sensitivity to seasonal hydrological variability, and a higher degree of natural protection against external sources of anthropogenic contamination. The necessity of improving integrated water resources management, modernizing water supply infrastructure, and implementing nature-based approaches aimed at the conservation and restoration of regional water resources is substantiated. *Key words:* water availability, water resources, Kharkiv region, water abstraction, groundwater, water use, water scarcity, water abundance, climate change.

Постановка проблеми. В умовах сучасних кліматичних змін та зростання антропогенного навантаження на водні екосистеми проблема забезпечення населення та господарського комплексу водними ресурсами набуває особливої актуальності. Харківська область належить до регіонів України

з обмеженими місцевими водними ресурсами та значною залежністю від поверхневих вод, що підвищує ризики виникнення водного дефіциту. За таких умов важливого значення набуває дослідження потенціалу підземних вод як надійного джерела водозабезпечення та складової сталого водокористування.



Актуальність дослідження. Адаптація систем водокористування Харківської області до наслідків кліматичних змін, що проявляються у зменшенні водності річок, збільшенні тривалості посушливих періодів та зростанні ризиків водного дефіциту. Підземні води є одним із найбільш стабільних джерел водопостачання, тому оцінка їх ролі у забезпеченні водної безпеки регіону має важливе наукове та практичне значення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження відповідає сучасним напрямкам наукових досліджень у сфері управління водними ресурсами, забезпечення водної безпеки та адаптації регіонів до змін клімату. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час розроблення регіональних стратегій водозабезпечення, програм раціонального використання підземних вод, а також заходів щодо підвищення стійкості водогосподарського комплексу Харківської області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових джерел свідчить про наявність значного наукового доробку щодо оцінки водних ресурсів, проблем водозабезпечення та раціонального водокористування. Значний внесок у дослідження питань характеристики водних ресурсів України, їх просторовому розподілу та сучасним тенденціям змін під впливом природних і антропогенних чинників, зробили В. К. Хільчевський, який на основі даних міжнародної інформаційної системи FAO Aquastat здійснив оцінку водних ресурсів України та сучасного стану поверхневих водних об'єктів [2; 6]. Питання впливу кліматичних змін на водність регіонів України та перспективи забезпечення водної безпеки розглянуто у роботі А. Новікової [3]. На глобальному рівні проблеми дефіциту водних ресурсів та екологічних обмежень водокористування досліджено у праці D. Vanham та співавторів [11]. Особливості формування ресурсів підземних вод Харківської області та перспективи їх використання для водопостачання населення висвітлено у роботі В. М. Прибилової [9]. Теоретичні та практичні аспекти охорони, раціонального використання й розвитку джерел питного водопостачання України ґрунтовно розкрито у дисертаційному дослідженні В. В. Яковлева [12]. Офіційні статистичні та аналітичні матеріали, що відображають сучасний стан водних ресурсів і водокористування Харківської області представлені даними міжнародної інформаційної бази даних продовольчої та сільськогосподарської організації ООН «FAO Aquastat» [1]; Державного агентства водних ресурсів України [4]; Регіонального офісу водних ресурсів у Харківській області [5]; регіональних доповідей про стан навколишнього природного середовища [7]; екологічних паспортів Харківської області [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість наукових праць щодо водних ресурсів України, недостатньо дослідженими залишаються питання комплексної оцінки ролі підземних вод у забезпеченні сталого водокористування Харківської області в умовах зростаючого дефіциту водних ресурсів та кліматичних змін. Потребують уточнення сучасний стан використання підземних вод, їх значення для компенсації дефіциту поверхневих вод та перспективи інтеграції підземних водних ресурсів у систему регіонального водозабезпечення.

Наукова новизна. Полягає у комплексній оцінці ролі підземних вод у забезпеченні сталого водокористування Харківської області з урахуванням сучасних тенденцій зміни водоресурсного потенціалу регіону. Визначено значення підземних вод як стратегічного ресурсу підвищення водної безпеки в умовах дефіциту водних ресурсів та кліматичних змін.

Методологічне або загальнонаукове значення. Полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінювання водоресурсного потенціалу регіону, що поєднує аналіз статистичних даних, гідрологічних характеристик та сучасних тенденцій водокористування. Отримані результати можуть бути використані для подальших наукових досліджень проблем водної безпеки, сталого водокористування та адаптації регіональних водогосподарських систем до змін клімату.

Викладення основного матеріалу. Україна належить до держав Європи з порівняно невисоким рівнем забезпеченості водними ресурсами. Згідно з даними Глобальної інформаційної системи FAO AQUASTAT, загальний обсяг водних ресурсів країни оцінюється приблизно у 175,3 км³ на рік. З представленого обсягу лише близько 55,1 км³, тобто майже третина, формується в межах території України, тоді як основна частина надходить із транскордонним річковим стоком із сусідніх країн [1, 2]. У структурі водних ресурсів переважають поверхневі води: приблизно 97 % припадає на річковий стік, тоді як частка підземних вод не перевищує 3 %, що свідчить про значну залежність водозабезпечення території від умов формування поверхневого стоку, насамперед від кліматичних чинників, зокрема температурного режиму та кількості атмосферних опадів, а також від ландшафтних особливостей місцевості.

Характерною рисою водних ресурсів України є суттєва нерівномірність їх територіального розподілу. Просторові відмінності у забезпеченості водними ресурсами окремих регіонів визначаються комплексом природних факторів, серед яких провідне значення мають кліматичні умови, особливості геологічної будови, рельєф території та рівень атмосферного зволоження (табл. 1).

У межах країни простежується чітка закономірність зменшення забезпеченості водними ресурсами

Таблиця 1

Порівняльна характеристика водності та умов її формування у природничих зонах України [3]

Показник	Карпати	Полісся	Лісостеп	Степ
Середньорічна температура повітря, °C	+4 – +7	+6 – +7	+7 – +9	+9 – +11
Середньорічна кількість опадів, мм	1000 – 1500	600 – 650	500 – 550	300 – 450
Річне випаровування, мм	450 – 550	500 – 550	600 – 700	700 – 900
Водний баланс (опадів – випаровування), мм	+400 – +900	+50 – +150	–50 – +50	–250 – 400
Середня висота території, м	600 – 1200	150 – 200	200 – 300	50 – 150
Густота річкової мережі, км/км²	0,8 – 1,1	0,3 – 0,5	0,2 – 0,3	0,05 – 0,15
Частка весняного стоку, %	35 – 40	50 – 60	45 – 55	40 – 50
Тип живлення річок	дощове та снігове	переважно снігове	снігово-дощове	дощово-снігове
Коефіцієнт стоку	0,40 – 0,55	0,15 – 0,20	0,10 – 0,15	0,03 – 0,07
Модуль стоку, л/с·км²	20 – 30	6 – 10	3 – 6	0,5 – 2
Ступінь водозабезпеченості	дуже висока	висока	середня	низька

у напрямку з північного заходу на південний схід, що пов'язано із зростанням континентальності клімату та зменшенням кількості атмосферних опадів [3].

Найбільші обсяги річкового стоку формуються у Карпатському регіоні та на північному заході країни, де річна кількість опадів зазвичай досягає 1000–1200 мм. Такі кліматичні умови сприяють накопиченню значних поверхневих водних ресурсів. Сучасні дослідження свідчать, що річкові системи Українських Карпат залишаються відносно стійкими до довгострокової зміни кліматичних чинників, хоча і в них уже простежуються трансформації сезонної структури стоку [3].

На відміну від західної частини країни, лісостепові та, насамперед, степові регіони України характеризуються значно нижчим рівнем водозабезпеченості. Для південних і південно-східних областей властиві незначна кількість опадів, високі літні температури та інтенсивне випаровування, що зумовлює дефіцит вологи. За таких умов формуються мало-водні річкові системи з нестабільним гідрологічним режимом, вираженими сезонними коливаннями та тривалими періодами межени. Рівень забезпеченості населення водними ресурсами у зазначених регіонах за міжнародними підходами відповідає показникам водного стресу або водного дефіциту.

Низькі показники забезпеченості водними ресурсами характерні для Харківської області, яка розташована у північно-східній частині України і на яку припадає близько **1,8 % загальних водних ресурсів країни**, що є одним із найнижчих показників серед областей держави [4].

Розташування Харківського регіону в межах двох природно-географічних зон Лівобережжя – Лісостепу та Степу зумовлює неоднорідність умов формування водних ресурсів на його території. Північна та центральна частини, які належать до

Лісостепу, характеризуються дещо вищою кількістю атмосферних опадів, густішою річковою мережею та відносно кращими показниками водозабезпечення. Водночас південні та південно-східні райони області мають риси степової зони, для якої властиві менші обсяги опадів, підвищене випаровування та дефіцит поверхневого стоку.

Порівняно з Карпатським регіоном і Поліссям, Харківська область має значно обмеженіший водоресурсний потенціал, який формується за рахунок поверхневих вод басейну річки Сіверський Донець, що складаються з транзитного і місцевого стоку, ресурсів басейну Дніпра, підземних вод експлуатаційного призначення. Усі водні об'єкти Харківської області відносяться до басейнів Дону (близько 75 % території) та Дніпра (близько 25 %) [5].

Гідрографічна мережа області характеризується значною розгалуженістю та включає 867 річок із сумарною довжиною 6405 км. Серед них 172 водотоки мають протяжність понад 10 км, а їх загальна довжина досягає 4666,6 км. Згідно з національною класифікацією водотоків, Сіверський Донець належить до категорії великих річок. Його загальна протяжність становить 1053 км, із яких близько 375 км проходять територією області [6]. До середніх річок віднесено Оскіл, Уди, Лопань, Мерлу, Оріль і Самару, тоді як інші водотоки належать до категорії малих річок. Через недостатнє атмосферне зволоження і переважно рівнинний рельєф більшість водотоків характеризується невисокими показниками модуля та коефіцієнта стоку, значною залежністю від сезонного сніготанення та нестійкістю водності у посушливі періоди року.

Отже, на сучасному етапі роль транзитного стоку для Харківської області є визначальною. У середньоводний рік близько 6,9 км³/рік (75 %) сумарних поверхневих водних ресурсів формується за рахунок транзитного припливу, переважно вод річки

Сіверського Донця, тоді як частка місцевого стоку становить лише близько **2,3 км³/рік** (25 %) [7]. Це свідчить про значну вразливість регіону до змін водогосподарської ситуації у суміжних басейнах України та транскордонних чинників.

За даними Харківської обласної військової адміністрації та матеріалів Державного водного кадастру, прогнозні ресурси підземних вод Харківської області станом на 2024 р. становлять 1 014,245 тис. м³/добу, тоді як затверджені експлуатаційні запаси оцінюються приблизно у 550,38 тис. м³/добу [8].

Згідно з гідрогеологічним районуванням України, територія Харківської області знаходиться в межах північно-східної частини Дніпровсько-Донецького артезіанського басейну, лише її крайня північно-східна частина відноситься до гідрогеологічної провінції Донецької складчастої області. Приуроченість до складу зазначених структур, похиле залягання товщ, чередування порід з різною водопроникністю, наявність розривних і складчастих тектонічних порушень обумовили розвиток на досліджуваній території складної системи водонесних горизонтів і комплексів.

Основні комплекси водоносних горизонтів, придатних для питного водопостачання, на більшій частині території Харківської області відносяться до зони активного водообміну, мають гідравлічний зв'язок із поверхнею та розвантажуються у вигляді джерел у долинах річок та балках. Це водоносний горизонт у берецьких і новопетрівських відкладах (P_3br+N_1np), водоносний комплекс в обухівських і межигірських відкладах ($P_2ob + P_3mž$), водоносний горизонт у канівських і бучацьких відкладах (P_2rd+ks), водоносний горизонт у тріщинуватій зоні мергельно-крейдових відкладів верхньої крейди (K_2), водоносний комплекс в альбсько-сеноманських (буромських) відкладах ($K_{1-2}br$).

Прогнозні ресурси прісних підземних вод, які мають важливе стратегічне значення для забезпечення стабільного водопостачання, локалізуються у глибоких водоносних комплексах Дніпровсько-Донецької западини. Завдяки значній глибині залягання та ізолюваності від активних процесів поверхневого водообміну ці води відзначаються високим ступенем природної захищеності та відносною сталістю хімічного складу. Вони мають значно повільніше природне поповнення, але вода у них часто характеризується підвищеною мінералізацією. Через це їх використання для питного водопостачання є обмеженим і потребує спеціальної водопідготовки [9].

Показники фактичного видобутку підземних вод та обсягів невикористаних прогнозних і експлуатаційних ресурсів свідчать про наявність значного резерву потенційно доступних ресурсів підземних вод, рівень освоєння яких залишається відносно невисоким. Наявність значного потенціалу для більш широкого залучення захищених водоносних

горизонтів до систем водопостачання особливо актуальна в умовах зростання вразливості поверхневих водних об'єктів до антропогенного забруднення та кліматичної зміни. Найбільш перспективними для збільшення водозабезпеченості Харківської області є бучацько-канівський та сеноман-крейдовий водонесні комплекси, а також горизонти палеогенових відкладів зони активного водообміну. Саме вони можуть стати основою формування більш стійкої системи питного водопостачання в умовах зменшення поверхневого стоку та посилення кліматичної аридизації.

Для аналізу системи водокористування Харківської області за даними, що представлені в Екологічних паспортах, опублікованих Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України, було побудовано графічну модель динаміки забору води з природних джерел упродовж 2014–2024 років (рис. 1). Представлений період має стійку тенденцію до підвищення темпів аридизації, що призвело до суттєвої трансформації всіх складових водного балансу перш за все, на території степової і лісостепової зон, та зміщення в бік дефіциту водних ресурсів. Рушійною силою цього процесу є випереджальне зростання температури повітря порівняно з динамікою атмосферних опадів. Основним чинником представлених змін є зростання сумарного випаровування, яке перевищує темпи зміни атмосферних опадів. У результаті відбувається зменшення річкового стоку та виснаження запасів вологи.

Аналіз динаміки водокористування у Харківській області у 2014–2024 роках свідчить про загальну тенденцію до скорочення обсягів забору води з природних джерел. За досліджуваний період сумарний водозбір зменшився з 338,0 до 197 млн м³, тобто приблизно на 41,7 %, що вказує на суттєве зниження інтенсивності використання водних ресурсів у регіоні. У структурі водокористування протягом усього досліджуваного періоду стабільно переважали поверхневі води, частка яких становила 87–90 % від загального обсягу водозабору. Відповідно, частка підземних вод залишалася значно меншою та коливалася в межах 10–13 %, що свідчить про високу залежність системи водопостачання області від поверхневих джерел, насамперед річкового стоку. Найвищі показники водозабору спостерігалися у 2014–2016 роках, коли загальний обсяг використання води перевищував 320 млн м³. Надалі простежувалася тенденція до поступового скорочення водокористування, яка особливо посилилася після 2021 року. У 2022–2023 роках зафіксовано мінімальні значення за весь період спостережень – 144,9 та 139,5 млн м³ відповідно, що майже у 2,5 рази менше порівняно з початковими показниками дослідження. Скорочення обсягів водозабору стосувалося як поверхневих, так і підземних вод. Обсяг використання поверхневих вод за досліджуваний період зменшився з 297,5 до 176,8 млн м³, тоді як підзем-

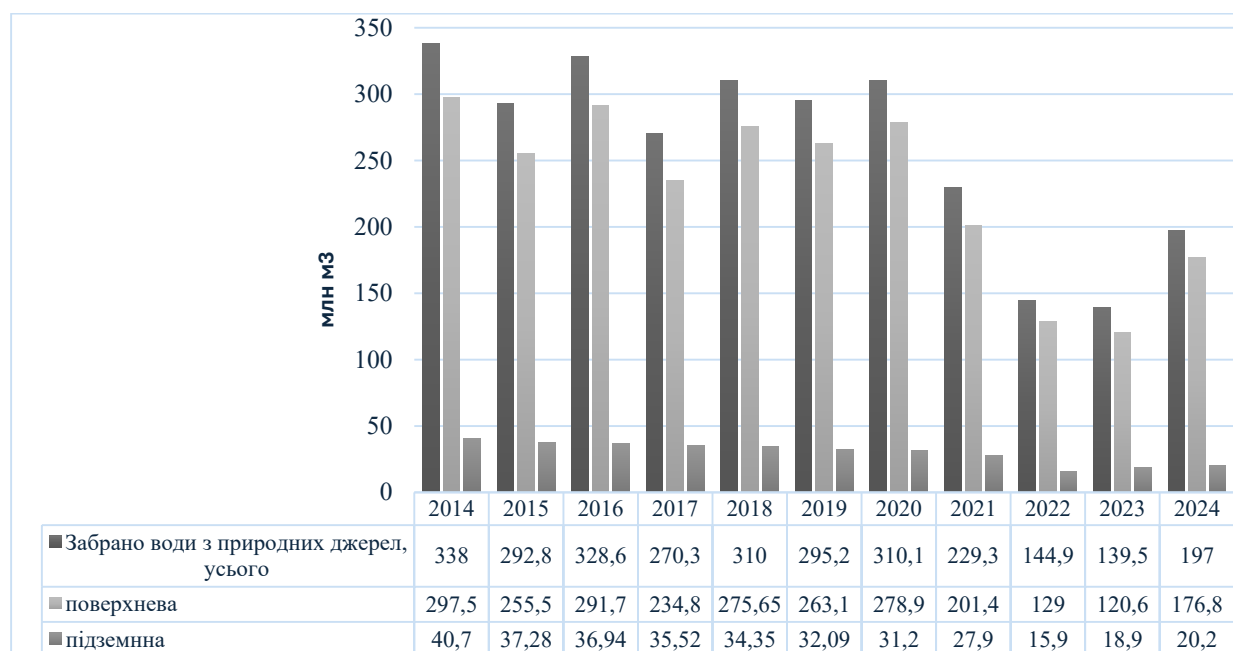


Рис. 1. Динаміка забору води з природних джерел у Харківській області у 2014–2024 роках
Джерело: розроблено автором на основі [10]

них – із 40,7 до 20,2 млн м³. При цьому темпи зниження водозабору підземних вод були дещо вищими, що може свідчити про обмеження експлуатації підземних водоносних горизонтів.

Отримані результати свідчать, що сучасна система водокористування Харківської області характеризується поступовим зниженням антропогенного навантаження на водні ресурси. Незважаючи на це, забезпеченість населення Харківської області водними ресурсами залишається порівняно низькою. Середньобогаторічна забезпеченість населення Харківської області сумарними водними ресурсами становить близько 1,3 тис. м³ на одного жителя за рік, що відповідно до міжнародного індикатора Фалькенмарк (Falkenmark indicator) відповідає рівню водного стресу та свідчить про наявність ознак водного дефіциту регіону. [11].

Водночас зберігається значна залежність регіону від поверхневих джерел водопостачання, які найбільше реагують на кліматичну зміну та техногенні впливи. Разом із тим, підземні води мають важливе значення для забезпечення стабільності водопостачання, оскільки характеризуються вищим рівнем природного захисту, більшою стабільністю якості та меншою залежністю від короткочасних кліматичних коливань. У зв'язку з цим раціональне поєднання використання поверхневих і підземних вод є одним із ключових напрямів забезпечення водної безпеки регіону.

Для оцінки ролі підземних вод у системі водокористування Харківської області було розраховано коефіцієнт використання підземних вод, який характеризує частку підземних джерел у загальному обсязі водозабору. Застосування представленого показника

дозволяє визначити рівень залежності регіону від експлуатації підземних водоносних горизонтів та оцінити структурні особливості системи водопостачання.

Розрахунок коефіцієнта використання підземних вод здійснювався за такою формулою (1):

$$K_{\text{пв}} = \frac{V_{\text{пв}}}{V_{\text{заг}}} \quad (1)$$

($K_{\text{пв}}$) – коефіцієнт використання підземних вод;

($V_{\text{пв}}$) – обсяг забору підземних вод, млн м³;

($V_{\text{заг}}$) – загальний обсяг забору води з природних джерел, млн м³.

Отримані результати розрахунків представлені у таблиці 2. Аналіз значень коефіцієнта дозволяє простежити зміну частки підземних вод у структурі водокористування Харківської області впродовж 2014–2024 років, а також оцінити ступінь залежності регіону від підземних джерел водопостачання в умовах трансформації водогосподарської системи та аридизації.

Аналіз коефіцієнта використання підземних вод у Харківській області свідчить, що протягом 2014–2024 років частка підземних вод у структурі загального водозабору залишалася відносно стабільною та коливалася в межах 10,1–13,5 %. Отримані значення підтверджують, що основу системи водопостачання регіону формують поверхневі води, тоді як підземні джерела виконують допоміжну, але стратегічно важливу функцію.

Найвищі значення коефіцієнта спостерігалися у 2017 та 2023 роках – 0,131 і 0,135 відповідно, що свідчить про відносне зростання ролі підземних вод у структурі водокористування в періоди скорочення

Таблиця 2

**Коефіцієнт використання підземних вод у структурі водозабору
Харківської області у 2014–2024 роках**

Рік	Загальний забір води, млн м ³	Підземні води, млн м ³	Коефіцієнт використання підземних вод ($K_{пв}$)	Частка підземних вод, %
2014	338,0	40,7	0,120	12,0
2015	292,8	37,28	0,127	12,7
2016	328,6	36,94	0,112	11,2
2017	270,3	35,52	0,131	13,1
2018	310,0	34,35	0,111	11,1
2019	295,2	32,09	0,109	10,9
2020	310,1	31,2	0,101	10,1
2021	229,3	27,9	0,122	12,2
2022	144,9	15,9	0,110	11,0
2023	139,5	18,9	0,135	13,5
2024	197,0	20,2	0,103	10,3

Джерело: розроблено автором на основі [10]

загального водозабору. Найнижчий показник був зафіксований у 2020 році – 0,101, коли частка підземних вод становила лише 10,1 %.

Загалом, результати розрахунків свідчать, що, попри невелику частку у структурі водозабору, підземні води мають важливе значення для забезпечення стабільності водопостачання, особливо в умовах зростання кліматичних ризиків та нестабільності поверхневого стоку. Вищий рівень природного захисту та більш стабільні якісні характеристики підземних вод зумовлюють необхідність їх раціонального використання та збереження як стратегічного резерву водних ресурсів регіону [12].

Головні висновки. Харківська область характеризується обмеженими місцевими водними ресурсами, високим рівнем господарського освоєння території та значною залежністю від транзитного стоку. Зниження рівня водозабезпечення у багатьох районах області пов'язане не тільки з обмеженістю природних запасів води, а з погіршенням її екологічного та гігієнічного стану під впливом антропогенної діяльності.

У результаті аналізу динаміки водокористування встановлено тенденцію до поступового скорочення обсягів забору води з природних джерел упродовж 2014–2024 років. Загальний водозабір зменшився більш ніж на 40 %. При цьому у структурі водопостачання стабільно переважали поверхневі води, частка яких перевищувала 85–90 %, тоді як підземні води становили близько 10–13 % загального водозабору. Незважаючи на зменшення водозабору, сучасна кліматична зміна та посилення процесів аридизації спричиняють поступове погіршення природної водозабезпеченості області, перш за все, за рахунок деградації малих річок.

Встановлено, що у перспективі саме підземні води можуть відігравати ключову роль у підвищенні

стійкості системи водозабезпечення Харківської області. Порівняно з поверхневими водами вони характеризуються більш стабільним режимом формування ресурсів, меншою залежністю від сезонних коливань та вищим рівнем природної захищеності від забруднення. Водночас сучасне використання підземних вод у багатьох районах області стримується недостатніми темпами природного поповнення водоносних горизонтів, локальним виснаженням запасів і деградацією територій живлення. Отже, забезпечення стабільної водозабезпеченості Харківської області потребує не лише модернізації систем водопостачання, а й комплексного відновлення природних механізмів акумуляції, затримання та збереження води у ландшафтах. У цьому контексті підтримання та нарощування ресурсів підземних вод слід розглядати як один із ключових елементів адаптації регіону до умов посилення аридизації та зростання дефіциту водних ресурсів.

Перспективи використання результатів дослідження. Одним із пріоритетних напрямів регіональної водної політики має стати реалізація заходів, спрямованих на збільшення ресурсів підземних вод та посилення водоутримуючої функції природних ландшафтів. Найбільш перспективними природоорієнтованими підходами є підвищення лісистості водозбірних басейнів, особливо у верхів'ях малих річок, відновлення заплавних екосистем і заболочених територій, що забезпечують акумулювання та поступову інфільтрацію води у водоносні горизонти, створення захисних лісосмуг і буферних прибережних смуг, скорочення рівня розораності ерозійно небезпечних земель, реконструкція ставків і малих водоутримуючих споруд для регулювання поверхневого стоку, а також застосування технологій штучного поповнення підземних вод шляхом інфільтрації очищених поверхневих вод у водоносні горизонти.

Література

1. Aquastat FAO's. URL: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=e> (дата звернення: 19.05.2026).
2. Хільчевський В. К. Характеристика водних ресурсів України на основі бази даних глобальної інформаційної системи FAO Aquastat. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 1 (59). С. 6–16. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.1>
3. Новікова А. Водність регіонів України у світлі зміни клімату. *Водна безпека: наукові рішення в умовах криз та трансформацій : зб. тез XIV Міжнар. наук.-практ. конф.* 2026. С. 253–257. DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg2026>.
4. Державне агентство водних ресурсів України : офіційний вебсайт. URL: <http://www.scwm.gov.ua/index> (дата звернення: 19.05.2026).
5. Регіональний офіс водних ресурсів у Харківській області : офіційний вебсайт. URL: <https://kharkov.davr.gov.ua/> (дата звернення: 19.05.2026).
6. Хільчевський В. К. Сучасна характеристика поверхневих водних об'єктів України: водотоки та водойми. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 1 (59). С. 17–27. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.2>.
7. Доповідь про стан навколишнього природного середовища в Харківській області у 2019 році Харків, 2020. 171 с. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1054/105379/Attaches/regionalna_dopovid_2019_harkivska_oblast.pdf (дата звернення: 19.05.2026).
8. Екологічний паспорт Харківської області. 2024 р. URL: https://kharkivoda.gov.ua/content/documents/1327/132692/Attaches/ekologichnyi_pasport_2024_rik.pdf (дата звернення: 19.05.2026).
9. Прибилова В. М. Підземні водні ресурси Харківської області та стратегія їх використання для водопостачання населення. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*. 2015. № 42(1157). С. 37-44. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2015-42-07>
10. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічні паспорти. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoryng/ekologichni-pasporty/> (дата звернення: 19.05.2026).
11. Vanham D, Alfieri L, Feyen L. National water shortage for low to high environmental flow protection. *Scientific Reports*. 2022 (12(1):3037). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06978-y>
12. Яковлев В. В. Перспективні джерела природних вод для питного водопостачання України, їх охорона і раціональне використання : дис. ... д-ра геол. наук : 21.06.01. Харків, 2017. 351 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЗМЕНШЕННЯ ВОДНОГО СЛІДУ ТА ЕВТРОФІКАЦІЇ ВОДОЙМ ПРИ ПЕРЕХОДІ НА СОНЯЧНУ ЕНЕРГЕТИКУ МЕДИЧНОГО ЗАКЛАДУ

Оліниченко Ю.О., Білик Т.І., Явнюк А.А.

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

пр. Любомира Гузара, 1, 03058, м. Київ

7232384@stud.kai.edu.ua

Використання викопного органічного палива для забезпечення енергетичних потреб людства призвело до такого забруднення різних сфер довкілля, що загрожувало виживанню нашої цивілізації. Гідросфера зазнає в цьому плані значного навантаження через акумуляцію поллютантів як із повітря через опади, так і з ґрунтів, через стічні води. Серед причин антропогенної евтрофікації водойм однією із найбільш значущих є забруднення довкілля внаслідок діяльності енергетичних підприємств, насамперед, теплових електростанцій (ТЕС). Рішенням проблеми є насамперед перехід на екологічно чисті джерела енергії у різних галузях людської діяльності, зокрема, на сонячну енергетику. Особливістю галузі охорони здоров'я є значна енергоємність внаслідок застосування спеціального обладнання, а також використання великих об'ємів води для дотримання відповідних гігієнічних стандартів. У наших попередніх дослідженнях розроблена комплексна концепція модернізації енергосистеми медичного центру «Інститут планування сім'ї». Вона базується на інтеграції двох взаємодоповнюючих напрямів: розробки енергозабезпечення на основі сонячної енергії, а також удосконалення традиційних енергоефективних заходів. У подальшому був зроблений прогностичний аналіз екологічного впливу різних варіантів впровадження системи енергозабезпечення медичного закладу за методологією оцінки життєвого циклу (Life cycle assessment). Метою даної роботи є аналіз водного сліду за методологією Water Footprint Network (WFN). Результати дослідження показали, що найбільше скорочення водного навантаження при впровадженні сонячної енергетики досягається завдяки зменшенню сірої води, тобто зниженню рівня техногенного забруднення водних екосистем. Загальне скорочення сірої води становить 2 400 м³/рік (74,3%), що є найбільшою складовою зменшення водного сліду. Це відображає системний екологічний ефект від переходу на відновлювані джерела енергії, які не потребують великих обсягів води для виробництва електроенергії та тепла і не створюють значного забруднення водних ресурсів, що зменшує евтрофікацію водойм, на відміну від традиційних теплових станцій. Впровадження сонячної генерації у поєднанні з накопичувачами енергії та комплексними заходами з ресурсоефективності дозволяє не лише скоротити викиди парникових газів, а й знизити водний слід (на 67,9%), що є важливим внеском у підвищення екологічної стійкості медичних закладів. Розрахунки показали також зниження викидів, виражених в еквівалентах фосфатів, на 934 кг РО₄-екв за плановий період експлуатації сонячних панелей (20 років), що еквівалентно запобіганню забруднення приблизно 47 кг чистого фосфору, здатного спричинити евтрофікацію значних водних площ. Такий результат підтверджує, що перехід медичного закладу до енергосистеми з використанням сонячної енергії сприяє реалізації принципів ресурсоефективності та сталого розвитку відповідно до Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія». *Ключові слова:* сонячна енергетика, водний слід, медичний заклад, вплив теплоелектростанцій на гідросферу, евтрофікація, аналіз життєвого циклу енергосистем.

Reducing the water footprint and water body eutrophication during a medical facility's transition to solar energy. Olinechenko Yu., Bilyk T., Yavniuk A.

The use of fossil fuels to meet humanity's energy needs has resulted in environmental pollution on a scale that threatens the survival of our civilization. The hydrosphere is under significant strain in this regard due to the accumulation of pollutants—derived from both atmospheric deposition and runoff from soils. Environmental pollution caused by energy sector operations—primarily thermal power plants—is a major driver of the anthropogenic eutrophication of water bodies. The primary solution to this problem is a transition to environmentally clean energy sources across various sectors of human activity, particularly solar energy. A distinctive feature of the healthcare sector is its high energy intensity, resulting from the use of specialized equipment and large volumes of water required to meet hygiene standards. In our previous studies, we developed a comprehensive concept for modernizing the energy system of the «Institute of Family Planning» medical center. It is based on the integration of two complementary approaches: the development of solar-based energy supply and the enhancement of traditional energy-efficiency measures. Subsequently, a predictive analysis of the environmental impact associated with various implementation options for the medical facility's energy supply system was conducted using the life cycle assessment methodology. The aim of this study was to analyze the water footprint in accordance with the Water Footprint Network (WFN) methodology.

The research results demonstrated that the greatest reduction in water-related impact through the implementation of solar energy is achieved by decreasing the «grey water» component—specifically, by lowering the level of anthropogenic pollution in aquatic ecosystems. The total reduction in grey water amounts to 2,400 m³/year (74.3%), representing the largest component of the water footprint reduction. This reflects the systemic environmental impact of transitioning to renewable energy sources, which do not require large volumes of water for electricity and heat generation or cause significant water pollution—thereby reducing the eutrophication of water bodies—unlike traditional thermal power plants. Implementing solar power generation, combined with energy storage systems



and comprehensive resource-efficiency measures, makes it possible not only to cut greenhouse gas emissions but also to reduce the water footprint (by 67.9%), marking a significant contribution to enhancing the environmental sustainability of medical facilities. Calculations also indicated a reduction in emissions—expressed in phosphate equivalents—of 934 kg PO₄-eq over the planned 20-year operational lifespan of the solar panels; this is equivalent to preventing the release of approximately 47 kg of pure phosphorus, an amount capable of causing eutrophication in significant bodies of water. This result confirms that the medical facility's transition to a solar-powered energy system supports the implementation of resource efficiency and sustainable development principles in line with the UN Sustainable Development Goals, specifically SDG 6 («Clean Water and Sanitation»). *Key words:* solar energy, water footprint, medical facility, impact of thermal power plants on the hydrosphere, eutrophication, life cycle analysis of energy systems.

Постановка проблеми.

Останніми роками конфлікти між захистом довкілля та зростаючими потребами в енергії й воді чинять значний тиск на сталий розвиток у різних сферах діяльності людини. Викиди парникових газів, токсичних оксидів сірки та азоту, що пов'язані з отриманням енергії з вичерпного палива, призводять до впливу на клімат, забруднення та евтрофікації водойм. Галузь охорони здоров'я характеризується значними витратами енергії та води внаслідок специфіки своєї діяльності. Впровадження сонячної енергетики у медичних закладах є найкращою альтернативою ТЕС та гідроенергетиці [1-4]. Сонячні панелі в процесі експлуатації не утворюють викидів у повітря парникових газів та токсичних речовин, можуть функціонувати без використання води. У наших попередніх дослідженнях розроблена комплексна концепція модернізації енергосистеми медичного центру «Інститут планування сім'ї». Вона базується на інтеграції двох взаємодоповнюючих напрямів: розроблення системи енергозабезпечення на основі сонячної енергії, а також удосконалення традиційних енергоефективних заходів. Для оцінки екологічної ефективності енергетичних систем у медичному закладі при впровадженні сонячної енергетики доцільно застосування методології визначення водного сліду та життєвого циклу [5-9]. Це інноваційний підхід, що дозволяє комплексно оцінити вплив на водні ресурси і виявити приховані екологічні переваги переходу на відновлювані джерела енергії, які не обмежуються лише скороченням викидів парникових газів.

Актуальність дослідження.

Водний слід визначається як загальний об'єм води, що використовується прямо та опосередковано певною діяльністю, вимірний у кубічних метрах, що охоплює як споживання блакитної та зеленої води, так і виробництво забрудненої сірої води. Він служить показником впливу продукту або діяльності на водні ресурси, подібно до екологічного та вуглецевого слідів. Останніми роками зростання світового споживання води та енергії, зумовлене збільшенням чисельності населення та економічним розвитком, призвело до посилення забруднення довкілля та підвищення вразливості людей до наслідків зміни клімату. З метою зменшення залежності від органічного палива, зниження рівня забруднення повітря та водних об'єктів, зростає виробництво енергії з відновлюваних джерел. Значний прогрес у використанні

сонячної енергії, зокрема у галузі охорони здоров'я, допоможе зберегти водойми, одночасно захищаючи навколишнє середовище від вуглецевого сліду. При впровадженні енергетичних систем у медичних закладах, враховуючи особливості їх енергоспоживання, важливо оцінити наслідки впливу на довкілля, зокрема на водні ресурси.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Визначення прогнозованого впливу на навколишнє середовище при впровадженні сонячної енергетики у медичних закладах проводилося в рамках імплементації Європейського зеленого курсу в Україні. Робота виконувалася в межах науково-дослідної теми кафедри екології, хімії та хімічної технології факультету наук про здоров'я Національного університету «Київський авіаційний інститут» «Розробка та впровадження практик екологічного управління в медичній галузі» (Державний реєстраційний номер 0125U000196, дата реєстрації 10.01.2025). Дане дослідження є фрагментом дисертаційної роботи на здобуття ступеню доктора філософії (PhD) аспіранта кафедри екології, хімії та хімічної технології Оліненченка Ю.О.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У багатьох сучасних наукових дослідженнях підкреслюється, що впровадження відновлюваної енергетики, насамперед, сонячної, зокрема у сфері охорони здоров'я, вже давно перестало бути лише інструментом боротьби зі зміною клімату, а є на сьогодні одним із ключових факторів енергетичної незалежності, економічного розвитку та стійкості країн до глобальних викликів [1-4, 8-10]. Саме такий висновок зробило і Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики (International Renewable Energy Agency – IRENA) у недавньому звіті «Renewable Power Generation Costs in 2025», який аналізує світові тенденції розвитку відновлюваної енергетики та зміну вартості технологій. Також відмічається, що обсяг води, необхідний для виробництва одиниці електроенергії за допомогою сонячних панелей, становить лише 1/200 частину від обсягу, що використовується типовою тепловою електростанцією [11]. У фундаментальному дослідженні «The renewable energy-water-environment nexus» (2023), що висвітлює зв'язок між відновлюваною енергією, водою та довкіллям, підкреслюється значення всебічної екологічної оцінки енергосистем при їх впровадженні [12]. Вода використовується для виробництва енергії (як традиційні, так і деякі системи відновлюваної

енергетики потребують води), тоді як енергія є необхідною для управління водними ресурсами при їх використанні. Технології відновлюваної енергетики (ВЕ), водні ресурси та довкілля тісно взаємопов'язані. Врахування їх зв'язків є критично важливим під час прийняття рішень щодо впровадження технологій ВЕ, а також в управлінні довкіллям та експлуатації наявних енергетичних і водних систем [13]. Для пошуку рішень, отримання економічних вигод і досягнення цілей сталого розвитку необхідно розуміти та враховувати взаємозв'язок між відновлюваною енергетикою, водними ресурсами та довкіллям.

Виділення невирішених раніше частин проблеми, котрим присвячується означена стаття. Концепція та аспекти модернізації енергосистеми та енергоменеджменту медичного центру «Інститут планування сім'ї», розроблення системи енергозабезпечення з використанням сонячних панелей, а також перспективи зменшення викидів, розглядалися у наших попередніх публікаціях [14-16]. Метою даної роботи було визначення водного сліду за міжнародно прийнятою методологією Water Footprint Network (WFN) при різних варіантах впровадження сонячних фотоелектричних систем для конкретного медичного закладу з урахуванням особливостей його енергоспоживання, а також прогностична оцінка впливу на евтрофікацію водойм.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розглянуті методи досягнення та оцінки екологічного ефекту при впровадженні сонячної енергетики дозволять закладам охорони здоров'я робити внесок у зменшення водного сліду та евтрофікації водойм.

Викладення основного матеріалу.

Проведено аналіз водного сліду (Water Footprint) медичного центру (МЦ) для трьох сценаріїв енергозабезпечення – базового (мережевого), із впровадженням сонячної електростанції (СЕС) та комбінованої (гібридної) системи з накопичувачами енергії (СЕС + СНЕ). Розрахунки виконано згідно з методологією Water Footprint Network (WFN) [5], яка враховує три основні складові водного сліду:

– блакитна вода (Blue Water) – обсяг прісної води, спожитої безпосередньо в технологічних і охолоджувальних процесах;

– сіра вода (Grey Water) – обсяг води, необхідний для розбавлення та асиміляції забруднюючих речовин до прийнятних концентрацій;

– зелена вода (Green Water) – обсяг опадів, який випаровується або використовується екосистемою в межах території закладу.

Результати розрахунків (табл. 1) показують, що загальний водний слід медичного центру у базовому сценарії становить 3 955 м³/рік. При переході на сонячну енергосистему водний слід скорочується більш ніж удвічі – до 1 860 м³/рік, а у випадку впровадження комбінованої системи СЕС + СНЕ – до 1 270 м³/рік. Це відповідає зменшенню сукупного впливу на водні ресурси на 67,9% порівняно з базовим станом, що є значним екологічним досягненням.

Блакитна вода, яка характеризує пряме споживання прісної води з централізованої системи водопостачання, у базовому сценарії становить 680 м³/рік. Цей компонент включає дві основні складові: споживання води для медичних та технічних процесів (560 м³/рік) і охолодження енергетичного обладнання (120 м³/рік).

Споживання води для медичних процесів охоплює всі технологічні потреби медичного центру: проведення медичних процедур, дезінфекція інструментів, підготовка розчинів, забезпечення санітарно-гігієнічних вимог, а також потреби персоналу та пацієнтів. При впровадженні комплексної програми ресурсоефективності, яка реалізується паралельно з модернізацією енергетичної системи, цей компонент зменшується до 380 м³/рік, що становить скорочення на 32,1% або 180 м³/рік. Скорочення споживання води для медичних процесів досягається завдяки комплексу заходів:

– впровадження водозберігаючого обладнання – встановлення сучасних кранів з аєгаторами, душових систем з обмежувачами витрати, безконтактних змішувачів, що забезпечує економію води на 25-30% без погіршення якості медичних послуг;

– системи рециркуляції та повторного використання води: впровадження локальних систем очищення та рециркуляції технічної води для непитних потреб (прибирання приміщень, зволоження повітря, охолодження допоміжного обладнання), що

Таблиця 1

Водний слід різних систем енергозабезпечення медичного закладу (м³/рік)

Компонент	Базовий сценарій	СЕС	СЕС + СНЕ	Зменшення (%)
Блакитна вода (безпосереднє споживання)	680	475	395	-41.9
– Медичні процеси	560	460	380	-32.1
– Охолодження обладнання	120	15	15	-87.5
Сіра вода (асиміляція забруднень)	3230	1340	830	-74.3
– Від виробництва електроенергії	2385	980	425	-82.2
– Від теплопостачання	845	360	405	-52.1
Зелена вода (випаровування)	45	45	45	0.0
Загальний водний слід	3955	1860	1270	-67.9

дозволяє повторно використовувати до 40% технічної води;

- оптимізація технологічних процесів – перехід на більш ефективні методи стерилізації, використання концентрованих дезінфікуючих розчинів, оптимізація режимів миття та дезінфекції, що знижує витрати води на 15-20%;

- навчання персоналу та підвищення культури водокористування: впровадження стандартних операційних процедур, регулярний моніторинг витрат води, мотивація персоналу до економного використання водних ресурсів.

Споживання води для охолодження енергетичного обладнання у базовому сценарії становить 120 м³/рік і забезпечує підтримання робочої температури кондиціонерів (20 одиниць), холодильного обладнання (4 одиниці), бойлерів (4 одиниці) та іншого енергоємного обладнання. При переході на сонячну генерацію потреба у воді для охолодження зменшується у вісім разів – до 15 м³/рік (скорочення на 105 м³/рік, або 87,5%), оскільки фотоелектричні панелі не потребують активного водяного охолодження, на відміну від традиційного електротехнічного обладнання. Залишкові 15 м³/рік припадають на охолодження інверторного обладнання та систем накопичення енергії, які мають значно нижчі потреби у охолодженні порівняно з конвенційними системами. Загальне скорочення блакитної води становить 285 м³/рік (41,9%), що відображає комплексний ефект від модернізації як енергетичної системи, так і системи водопостачання медичного центру.

Основний внесок у водний слід у базовому сценарії формує сіра вода, необхідна для асиміляції забруднюючих речовин, що виникають під час виробництва електричної та теплової енергії на централізованих джерелах. У базовому випадку цей компонент становить 3 230 м³/рік, або понад 81,6% загального водного сліду, що підкреслює домінуючий вплив опосередкованого забруднення над прямим споживанням води. Сіра вода від виробництва електроенергії (2 385 м³/рік у базовому сценарії) розраховується на основі емісійних факторів для української енергосистеми, де значну частку становлять теплові електростанції. При спалюванні вугільного палива (вугілля, природного газу) утворюються забруднюючі речовини – діоксид сірки (SO₂), оксиди азоту (NO_x), тверді частинки, важкі метали, – які через атмосферні опади та стічні води потрапляють у водні об'єкти. Для нейтралізації цих забруднень до рівня природних фонових концентрацій теоретично потрібен значний обсяг чистої води. Розрахунок сірої води виконано з використанням середньозваженого фактору водного сліду для української енергосистеми – 59,8 літрів на кіловат-годину виробленої електроенергії. Цей фактор узгоджується з даними Water Footprint Network для енергосистем з високою часткою вугільної генерації (50-80 л/кВт·год) і відображає реальну структуру української енергетики станом на 2025 рік.

При впровадженні сонячної електростанції частина електроспоживання покривається за рахунок власної генерації, що зменшує навантаження на централізовану енергосистему. Однак сонячна генерація також має певний водний слід, пов'язаний з життєвим циклом фотоелектричних панелей – виробництво кремнію, охолодження обладнання під час виготовлення панелей, їх транспортування та монтаж. Фактор водного сліду для сонячної енергії становить приблизно 5,0 л/кВт·год при розподілі на 25 років експлуатації, що в 12 разів менше, ніж у традиційної генерації. Виробництво сонячних панелей, як і будь-який інший промисловий процес, потребує певної кількості води. Однак застосування ефективних технологій виробництва та методів повторного використання ресурсів дозволяє зменшити використання води і мінімізувати негативний вплив на довкілля.

У сценарії СЕС + СНЕ споживання з централізованої мережі скорочується приблизно до 12 500 кВт·год/рік (при загальному споживанні близько 33 000 кВт·год/рік), решта покривається власною генерацією (20 625 кВт·год/рік). Відповідно, сіра вода від електроенергії зменшується до 425 м³/рік:

- від мережевої електроенергії: $12\,500 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,0598 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{год} = 747 \text{ м}^3$;

- від сонячної генерації (LCA): $20\,625 \text{ кВт}\cdot\text{год} \times 0,005 \text{ м}^3/\text{кВт}\cdot\text{год} = 103 \text{ м}^3$.

За вирахуванням непікового споживання та оптимізації: $\approx 425 \text{ м}^3$

Скорочення становить 1 960 м³/рік або 82,2%, що підтверджує значний екологічний ефект переходу на відновлювані джерела енергії.

Сіра вода від теплопостачання (845 м³/рік у базовому сценарії) пов'язана з роботою централізованих газових котелень, які також є джерелом викидів забруднюючих речовин, хоча й у менших обсягах порівняно з вугільними ТЕС. Розрахунок виконано з фактором 14,8 м³ сірої води на одну гікалорію теплової енергії, що відповідає типовим показникам для газових котелень (10-20 м³/Гкал).

При впровадженні заходів з теплоізоляції будівлі та оптимізації систем опалення потреба в централізованому теплопостачанні зменшується приблизно з 57 Гкал/рік до 48 Гкал/рік. Водночас підвищується ефективність використання теплової енергії, що зменшує питомий фактор сірої води. У результаті сіра вода від теплопостачання скорочується до 405 м³/рік (зменшення на 52,1% або 440 м³/рік). Загальне скорочення сірої води становить 2 400 м³/рік (74,3%), що є найбільшою складовою зменшення водного сліду і відображає системний екологічний ефект від переходу на чистіші джерела енергії.

Зелена вода, що відображає природні процеси випаровування атмосферних опадів з території медичного центру, залишається сталою у всіх розглянутих сценаріях – 45 м³/рік. Цей обсяг відпові-

дає випаровуванню приблизно 46 мм опадів на рік з площі даху будівлі (971,4 м²), що узгоджується з типовими гідрологічними характеристиками для м. Києва, де середньорічна кількість опадів становить близько 600 мм, а випаровування з непроникних поверхонь – 50-100 мм/рік. Зелена вода не залежить від типу енергетичної системи і визначається виключно кліматичними умовами та характеристиками території. Цей компонент має мінімальний внесок у загальний водний слід (1,1-3,5% залежно від сценарію) і не має суттєвого впливу на результати порівняльного аналізу.

Зменшення водоспоживання на 390 м³/рік характеризує загальну економію фізичного обсягу води з централізованого водопостачання для всіх потреб медичного центру, що включає як блакитну воду у водному сліді (285 м³/рік за рахунок медичних процесів та охолодження), так і додаткову економію в системах водовідведення, зменшення втрат у внутрішніх мережах та оптимізацію побутового водокористування (105 м³/рік). Водний слід є більш широким екологічним показником, що враховує не лише пряме споживання води закладом, але й системний вплив на водні екосистеми через ланцюг енергопостачання. Скорочення загального водного сліду на 2 685 м³/рік (67,9%) значно перевищує зменшення прямого водоспоживання, оскільки основний ефект досягається за рахунок компонента сірої води – зменшення опосередкованого забруднення водних ресурсів при переході на екологічно чисті джерела енергії.

Результати аналізу водного сліду доповнює визначення екологічних переваг від впровадження сонячної енергетики, розраховане за методологією Life cycle assessment (LCA) для терміну використання сонячних панелей 20 років, представлено в таблиці 2.

Для закладів України застосування LCA-підходу регламентується міжнародними стандартами ISO 14040:2006 (ISO 14040:2006 [6, 7]. Споживання води (Water Consumption) є однією з найбільш критичних категорій впливу, де спостерігається найбільше зменшення при впровадженні сонячної генерації. У базовому сценарії споживання води становить 232 525 м³ за весь час експлуатації, тоді як у сценарії СЕС + СНЕ цей показник знижується до 11 850 м³, що становить зменшення на 94,9%. За 20 років експлуатації впровадження сонячної електростанції дозволить зекономити 220 675 м³ прісної води.

Евтрофікація (Eutrophication) – процес надмірного збагачення водних екосистем біогенними еле-

ментами (азот, фосфор), що призводить до порушення екологічної рівноваги, «цвітіння» води та деградації водних об'єктів. Викиди, виражені в еквівалентах фосфатів, становлять 2038 кг РО₄-екв у базовому сценарії та 1104 кг РО₄-екв у сценарії СЕС + СНЕ, що відповідає зменшенню на 45,8%. Основним джерелом викидів, що спричиняють евтрофікацію, є спалювання викопного палива на електростанціях, оскільки при цьому утворюються оксиди азоту та фосфору, які потім осідають на поверхню водойм або потрапляють у них зі стічними водами. Впровадження сонячної генерації дозволяє знизити ці викиди на 934 кг РО₄-екв за 20 років, що еквівалентно запобіганню забруднення приблизно 47 кг чистого фосфору, здатного спричинити евтрофікацію значних водних площ. Слід зазначити, що повідомлялося, як впровадження відновлюваних джерел зменшує індекси евтрофікації (евтрофного потенціалу) на 25-40% протягом життєвого циклу енергооб'єкта у порівнянні з традиційною енергетикою [11, 17].

Головні висновки. Результати аналізу водного сліду свідчать, що найбільше його скорочення при переході на сонячну енергетику медичного закладу досягається завдяки зменшенню сірої води, тобто зниженню рівня техногенного забруднення водних екосистем. Це відображає системний ефект від впровадження відновлюваних джерел енергії, які не потребують великих обсягів води для виробництва електроенергії та тепла і не створюють значного забруднення водних ресурсів, на відміну від традиційних теплових станцій. Вплив евтрофікації – перенасичення середовища біогенними елементами, що призводить до деградації водних екосистем – також суттєво скорочується: на 61,6% для СЕС та на 70,7% для СЕС + СНЕ, що є наслідком зниження обсягів забруднення стічних вод і переходу на енергію, що не потребує водомістких процесів.

Отже, впровадження сонячної генерації у поєднанні з накопичувачами енергії та комплексними заходами з ресурсоефективності дозволяє не лише скоротити викиди парникових газів, а й суттєво знизити водний слід (на 67,9%), що є важливим внеском у підвищення екологічної стійкості медичних закладів. Такий результат підтверджує, що перехід до гібридної енергосистеми сприяє реалізації принципів ресурсоефективності та сталого розвитку відповідно до Цілей сталого розвитку ООН, зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та санітарія» і ЦСР 13 «Боротьба зі зміною клімату».

Таблиця 2

Аналіз життєвого циклу для різних варіантів енергозабезпечення МЦ

Категорія впливу	Одиниця виміру	Базовий сценарій	СЕС	СЕС + СНЕ	Зменшення (СЕС+СНЕ vs Базовий)
Евтрофікація	кг РО ₄ -екв	2038	1071	1104	-45.8
Споживання води	м ³	232525	11850	11850	-94.9

Перспективи використання результатів дослідження. Порівняння варіантів підтвердило доцільність переходу МЦ «Інститут планування сім'ї» на гібридну систему енергозабезпечення, яка поєднує економічну ефективність і екологічну

безпечність протягом усього життєвого циклу. Отримані результати можуть бути використані для подібних медичних закладів для прогнозування впливу на довкілля при впровадженні сонячних фотоелектричних систем.

Література

1. Dion H., Evans M., Farrell P. Hospitals management transformative initiatives; towards energy efficiency and environmental sustainability in healthcare facilities. *Journal of Engineering, Design and Technology*. 2023. Vol. 21, Issue 2. PP. 552–584. doi: <https://doi.org/10.1108/JEDT-04-2022-0200>.
2. Sharma L., Singh J., Dhiman R., Vargas Nunez D., Antoinette E. B., Joshi K. J., Modi B., Padhi A., Tandon J. K., Seidel M. Advancing Solar Energy for Primary Healthcare in Developing Nations: Addressing Current Challenges and Enabling Progress Through UNICEF and Collaborative Partnerships. *Cureus*. 2024. 16 (1): e51571. doi: <https://doi.org/10.7759/cureus.51571>.
3. Health care's climate footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm and ARUP. 2019. 48 p. URL: https://global.noharm.org/sites/default/files/documents-files/5961/HealthCaresClimateFootprint_092319.pdf (request date: 15.06.2026).
4. Temel P., Kentel E., Alp E. Development of a site selection methodology for run-of-river hydroelectric power plants within the water-energy-ecosystem nexus. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 856, Part 2. 159152. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159152>.
5. Water Footprint Network (WFN). URL: <https://www.waterfootprint.org/> (request date: 20.06.2026).
6. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2006. 17 p.
7. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva: International Organization for Standardization. 2006. 37 p. URL: <https://surl.li/pmbchi> (request date: 15.06.2026).
8. Gerbens-Leenes W., Vaca-Jiménez S. D. Water Footprint and Energy Sustainability. *Water*. 2026. Vol. 18, Issue 13. 1632. doi: <https://doi.org/10.3390/w18131632>.
9. Chang Jo-Lei. Water Resource Challenges in the Renewable Energy Transition: A Life Cycle and Climate Nexus Perspective. *Science and Technology of Engineering, Chemistry, and Environmental Protection*. 2025. Vol. 1, No. 4, Issue 4. PP. 5246–5254. doi: <https://doi.org/10.61173/asst5246>.
10. Sevda Kuşkaya, Faik Bilgili, Erhan Muğaloğlu et al. The role of solar energy usage in environmental sustainability: Fresh evidence through time-frequency. *Renewable Energy*. 2023. Vol. 206. PP. 858–871.
11. IRENA Renewable power generation costs in 2025, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2026. URL: https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2026/Jul/IRENA_TEC_RPGC_2025_Executive_summary_2026.pdf (request date: 25.05.2026).
12. Nidia S. Caetano, Florinda F. Martins, Gisela Marta Oliveira. Life cycle assessment of renewable energy technologies. In: *The renewable energy-water-environment nexus: monography* / edited by: Shahryar Jafarinejad and Bryan S. Beckingham. Amsterdam: Elsevier, 2024. PP. 37–79. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13439-5.00002-8>.
13. Shahryar Jafarinejad, Bryan S. Beckingham. Introduction to renewable energy–water–environment nexus. In: *The renewable energy-water-environment nexus: monography* / edited by: Shahryar Jafarinejad and Bryan S. Beckingham. Amsterdam: Elsevier, 2024. P. 133–141. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13439-5.00005-3>.
14. Оліненченко Ю.О., Білик Т.І., Дудар Т.В. Зменшення впливу на довкілля та енергонезалежність медичного закладу при впровадженні сонячних фотоелектричних панелей. *Відновлювана енергетика*. 2025. № 2 (81). С. 140–150. doi: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).140-150](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).140-150).
15. Оліненченко Ю. О. Енергоефективність закладів охорони здоров'я як чинник зменшення вуглецевого сліду. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2025. № 60. С. 88–92. doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.16>.
16. Оліненченко Ю. О. Зменшення викидів парникових газів при різних варіантах впровадження сонячних фотоелектричних систем у медичному закладі. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2025. № 63. С. 210–215. doi: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.33>.
17. Medalie L., Galanter A.E., Martinez A.J., Archer A.A., Luukkonen C.L., Harris M.A., Haynes J.V. Water use across the conterminous United States, water years 2010–20. In: *Geological Survey Integrated Water Availability Assessment–2010–20*. Chap. D, Professional Paper 1894–D. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, 2025. 56 p. doi: <https://doi.org/10.3133/pp1894D>.

Дата першого надходження статті до видання: 15.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

АНТРОПОГЕННА ТРАНСФОРМАЦІЯ ТА НОРМАТИВНО-КАДАСТРОВІ КОЛІЗІЇ ВОДООХОРОННИХ ЗОН В УКРАЇНІ (НА ПРИКЛАДІ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ)

Калин Б.М.

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій

імені С.З. Гжицького

вул. Пекарська, 50, 79010, м. Львів

dana24b@lukr.net

У статті проаналізовано сучасний екологічний та законодавчий стан функціонування водоохоронних зон (ВЗ) та прибережних захисних смуг (ПЗС) в Україні на прикладі Львівської області. Актуальність дослідження зумовлена антропогенним навантаженням на прибережні екосистеми внаслідок сільськогосподарського освоєння заплавл, урбанізації та видобутку руслових наносів, що призводить до втрати водними об'єктами здатності до самоочищення. На основі аналізу нормативно-правової бази України (Водний та Земельний кодекси) та методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) виявлено чотири основні типи антропогенної трансформації ПЗС: агрогенний, урбаністичний, гідроморфологічний та рекреаційний. Встановлено, що ключовою законодавчою колізією є розрив між «автоматичним» правовим статусом ПЗС та відсутністю офіційно винесених у натуру меж, які зафіксовано в Державному земельному кадастрі лише для близько 35% малих річок. Простежено еволюцію водоохоронного законодавства України через три етапи – від адміністративного нормування до басейнового принципу управління в контексті імплементації Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС. Обґрунтовано, що застосування ГІС-моделювання дозволяє подолати розрив між статичними кадастровими межами та динамічними русловими процесами, забезпечуючи об'єктивну верифікацію порушень режиму господарювання незалежно від їхнього юридичного статусу. Розглянуто зарубіжний досвід диференційованого підходу до встановлення ширини прибережних буферів. Результати дослідження можуть бути використані басейновими управліннями водних ресурсів для розробки динамічних меж охоронних зон та подолання нормативно-кадастрових колізій. *Ключові слова:* водоохоронна зона, прибережна захисна смуга, землі водного фонду, басейновий принцип управління, Водна рамкова директива ЄС, техногенна трансформація, ГІС-технології, дистанційне зондування Землі, екологічний моніторинг.

Anthropogenic transformation and regulatory-cadastral collisions of water protection zones in Ukraine (case study of Lviv region). Kalyn B.

The article analyzes the current ecological and legal state of the functioning of water protection zones (WPZ) and riparian buffer strips (RBS) in Ukraine, using the Lviv region as a case study. The relevance of the research is driven by anthropogenic pressure on riparian ecosystems caused by the agricultural development of floodplains, urbanization and riverbed sediment extraction, which leads to the loss of the self-purification capacity of water bodies. Based on an analysis of Ukraine's regulatory framework (the Water and Land Codes) and remote sensing (RS) methods, four main types of anthropogenic transformation of RBS were identified: agrogenic, urban, hydromorphological and recreational. It was established that the key legislative collision is the gap between the "automatic" legal status of RBS and the absence of officially surveyed boundaries, which are recorded in the State Land Cadastre for only about 35% of small rivers. The evolution of Ukraine's water protection legislation is traced through three stages – from administrative regulation to the basin management principle in the context of implementing the EU Water Framework Directive 2000/60/EC. It is substantiated that the application of GIS modelling satellite data makes it possible to bridge the gap between static cadastral boundaries and dynamic channel processes. The experience of other countries regarding a differentiated approach to establishing the width of riparian buffers is considered. The results of the study can be used by river basin management authorities and local self-government bodies to develop dynamic boundaries of protected zones and overcome regulatory and cadastral collisions. *Key words:* water protection zone, riparian buffer strip, water fund lands, basin management principle, EU Water Framework Directive, technogenic transformation, GIS technologies, remote sensing, environmental monitoring.

Постановка проблеми. Сучасний етап розвитку суспільства характеризується загостренням суперечностей між інтенсивним природокористуванням та обмеженою здатністю водних екосистем до самовідновлення: річкові системи є одними з найвразливіших до антропогенного тиску, а прибережні

території стають зонами прямого втручання – від забудови до інтенсивного агровиробництва. Як зазначають [3, 14], трансформація прибережних ландшафтів потребує переходу до високотехнологічних методів контролю, зокрема космічного моніторингу.



Актуальність дослідження. Актуальність вивчення проблем функціонування водоохоронних зон (ВЗ) зумовлена необхідністю подолання «нормативного розриву» між застарілими адміністративними методами та сучасними стратегіями екосистемного управління, зокрема в контексті імплементації Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС і впровадження басейнового принципу, де прибережна захисна смуга розглядається не як обмеження, а як активний екосистемний буфер. Особливого значення це набуває для Львівської області, де специфіка гідрографічної мережі (басейни Дністра та Західного Бугу) поєднується з високою щільністю населення та інтенсивним господарським освоєнням заплавл.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах науково-дослідної тематики кафедри екології та захисту довкілля ЛНУВМБ імені С.З. Гжицького та узгоджується із завданнями впровадження в Україні басейнового принципу управління водними ресурсами відповідно до Закону України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом», а також методологічними підходами ініціативи European Union Water Initiative Plus (EUWI+) [13], спрямованої на гармонізацію національної водної політики з вимогами Водної рамкової директиви ЄС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та нормативно-правові засади формування ВЗ розглядаються в юридичній та екологічній літературі під різними кутами. Буцьких Д.О. простежив еволюцію законодавчого регулювання земель водного фонду [1], а Третяк В.М. зі співавторами показали, що зміни підходів до встановлення меж ПЗС відбувались услід за реформами земельного законодавства [12]. Експериментально доведено здатність рослинності ВЗ затримувати до 70–90% біогенних елементів [15] та обґрунтовано пріоритетність інженерно-біотехнічних заходів облаштування таких зон [10]. Питання інтеграції ГІС-технологій та дистанційного зондування Землі у моніторинг земель водного фонду розглянуто від руслового моніторингу до ГІС-моделювання ландшафту басейну [6-7, 11, 14]. Порівняльно-правові питання імплементації Водної рамкової директиви ЄС та кримінально-правової охорони вод піднімають [4], інституційне забезпечення землекористування ВЗ – [8]. Попри це, комплексний аналіз, що поєднував би типологію антропогенної трансформації прибережних ландшафтів конкретного регіону з верифікацією нормативно-кадастрових колізій, залишається недостатньо розробленим.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості публікацій щодо окремих аспектів охорони водних об'єк-

тів, недостатньо дослідженою залишається проблема системного зіставлення типів антропогенної трансформації водоохоронних зон із конкретними нормативно-кадастровими колізіями на регіональному рівні. Зокрема, для басейнів річок Львівської області (Дністра, Західного Бугу) бракує комплексної геопросторової оцінки розбіжностей між «паперовими» межами прибережних захисних смуг та їх фактичним станом, встановленим за даними дистанційного зондування Землі.

Новизна. Уперше для водних об'єктів Львівської області здійснено комплексну типологізацію антропогенної трансформації ВЗ і ПЗС (агрогенний, урбаністичний, гідроморфологічний та рекреаційний типи) у поєднанні з аналізом нормативно-кадастрових колізій, що виникають при встановленні їхніх меж.

Методологічне або загальнонаукове значення. Отримані результати формують методологічне підґрунтя для переходу від нормативно-адміністративного до інтегрованого басейнового підходу в управлінні землями водного фонду. Запропонований алгоритм поєднання ландшафтно-індикаційного аналізу з ГІС-верифікацією та методами дистанційного зондування Землі може бути застосований для обґрунтування динамічних меж охоронних зон інших річкових басейнів України, що має загальнонаукове значення для розвитку методології екологічного моніторингу прибережних територій.

Викладення основного матеріалу. У системі природоохоронного менеджменту водоохоронна зона визначається як територія значної протяжності, прилегла до акваторії водного об'єкта, на якій встановлюється спеціальний режим господарювання для запобігання забрудненню, засміченню та вичерпанню вод, якщо прибережна захисна смуга (ПЗС) є безпосереднім «останнім кордоном» фільтрації, то ВЗ виступає як дифузний бар'єр усього мікробасейну. В Україні налічується 63119 річок і струмків загальною протяжністю 206 тис. км, що вимагає значних площ ВЗ з урахуванням заплавл та надзаплавних терас.

Такі буфери перехоплюють забруднення ще до його потрапляння у річище, підтримуючи здатність водойм до самовідновлення. Видовий склад рослинного покриву визначає повноту затримання сполук азоту й фосфору [15], а коренева система та надземна маса рослин діють як механічний і хімічний уловлювач: осідають тверді частки, накопичуються важкі метали й пестициди. Грамотно підібрана деревно-чагарникова смуга здатна вдсятеро сповільнити рух стічних вод, стримуючи змив ґрунту та замулення русла [10], проте цей ефект зберігається лише за умови просторової цілісності смуги – розірвана рослинність одразу втрачає і гідрологічну, і геоморфологічну, і термічно-біологічну функції.

Еволюція правового регулювання земель водного фонду в Україні відображає перехід від ресурсного до екоцентричного управління; аналіз норматив-

но-правової бази дозволяє виділити три ключові етапи цієї трансформації [12] (табл. 1).

На відміну від українських фіксованих нормативів, у країнах ЄС (Польща, Німеччина, Чехія) ширина прибережних зон залежить від гідрологічних ризиків і крутизни схилів [15]. Ст. 87 ВК України так само забороняє в межах ВЗ полігони відходів, накопичувачі стічних вод та стійкі пестициди.

Згідно зі статистикою Держводагентства, лише близько 35% малих річок мають офіційно встановлені та внесені до Державного земельного кадастру межі ПЗС. У країнах ЄС аналогічна проблема нівелюється через систему Cross-compliance (перехресної відповідальності): фермер не отримає субсидію, якщо ГІС-моніторинг зафіксує розорювання ближче ніж за 5–10 метрів до урізу води, незалежно від того, чи встановлені межі «в натурі» [9].

Дослідження ґрунтується на матеріалах річкових басейнів Львівської області – регіону, що лежить одразу на двох водозборах, балтійському та чорноморському, а тому охоплює контрастні типи прибережних ландшафтів: рівнинні, сильно розорані заплави півночі області (Західний Буг, Рата, Солокія, Солотвина), паводконебезпечні передгірні та гірські

річки басейну Дністра (Стрий, Опір, Тисмениця) й урбанізовані водотоки львівської агломерації (Полтва, Зубра).

На основі проведеного аналізу виділено чотири базові типи антропогенної трансформації водоохоронних зон і прибережних захисних смуг. Найбільш масштабна – агрогенна: рілля на знімках доходить до урізу води, порушуючи фільтрацію стоку, а рослинність ПЗС, що затримує до 70–90% азотних і фосфорних сполук, заміщується монокультурами (рис. 1).

Урбаністична фрагментація пов'язана з герметизацією поверхні (асфальтування, бетонування), що блокує інфільтрацію дощових вод (табл. 2, рис. 2).

Гідроморфологічна дестабілізація зумовлена самовільним видобутком руслових наносів та розчищенням берегів від захисної деревної рослинності, що провокує посилену донну та бічну ерозію (рис. 3). Техногенно-рекреаційна деградація виникає внаслідок нерегульованого рекреаційного навантаження навіть на неупорядковані та незабудовані ділянки ПЗС.

Ефективність ВЗ та ПЗС як біофільтрів прямо залежить від чіткості їхнього правового статусу. За ст. 88 ВК та ст. 60 ЗК України [2, 5], ПЗС є частиною

Таблиця 1

Порівняльна характеристика етапів еволюції водоохоронного законодавства України

Параметр порівняння	До 2010 р.	2010–2016 рр.	З 2016 р. (басейнова модель)
Основний принцип	Адміністративно-територіальний	Природоохоронний	Екосистемний (басейновий принцип)
Визначення меж ПЗС	Фіксовані нормативи 25/50/100 м	Уточнення з урахуванням ПЗФ	Динамічні межі в ПУРБ
Інструмент контролю	Паперові проекти	Посилення відповідальності	ГІС-моніторинг, ДЗЗ та цифрові кадастри



Рис. 1. Космічний знімок фрагмента річкової долини із ознаками агрогенної трансформації ПЗС: р. Стрий біля м. Жидачів Стрийського району

Таблиця 2

Типологія та екологічні наслідки забудови прибережних захисних смуг

Тип забудови (трансформації)	Основні об'єкти-деструктори	Пріоритетні екологічні ризики
1. Господарсько-технічна забудова	Автостоянки, СТО, склади відкритого типу, майданчики зберігання відходів	Герметизація поверхні; нафтопродукти й важкі метали; засмічення та хімічне забруднення русел під час паводків
2. Селітебна (житлова)	Приватні домоволодіння, огорожі, котеджні містечка, елінти	Порушення вільного доступу до води; ризик потрапляння неочищених стоків; знищення заплавних екосистем



Рис. 2. Селітебна забудова ПЗС: фрагментація берегової лінії р. Солокія, м. Шептицький



Рис. 3. Гідроморфологічна дестабілізація русла річки внаслідок видобутку руслових наносів та втрати захисних насаджень (р. Стрий біля с. Ходовичі Стрийського району)

ВЗ із суворішим режимом обмежень, проте ключовою проблемою залишається колізія між «автоматичним» статусом цих зон та необхідністю розроблення проєктів землеустрою. Ситуацію ускладнює диспозитивне трактування ст. 88 ВК України: межі ПЗС у населених пунктах встановлюються виключно на

основі містобудівної документації, що на практиці дозволяє легалізувати хаотичну забудову шляхом офіційного звуження екологічних меж смуг.

Подолання цих колізій потребує пріоритету екологічних критеріїв над статичними кадастровими межами – динамічного коригування меж ПЗС за

зміни русла, ліквідації «запечаткування» ґрунтів та фітомеліорації деградованих ділянок. Дані ДЗЗ надвисокої роздільної здатності дають змогу об'єктивно верифікувати капітальні споруди незалежно від їхнього статусу в ДЗК, автоматично накладаючи нормативну сітку ПЗС (25/50/100 м) на актуальну берегову лінію.

Головні висновки. Проведений аналіз показує, що ефективність водоохоронних зон як екологічного бар'єра визначається насамперед станом рослинного покриву та ґрунтів, здатних затримувати поверхневий стік і забруднюючі речовини, тоді як басейновий принцип управління, попри його офіційне визнання, на рівні конкретних громад переважно залишається формальністю: стратегічні рішення річкового масштабу не встигають за оперативними земельними процесами на місцях. Ситуацію ускладнює те, що межі прибережних захисних смуг здебільшого не винесені в натуру, а тому фактично не захищають береги від незаконної забудови чи розорювання. Виявлена типологія трансформацій – агрогенна, урбаністична, гідроморфологічна та рекреаційна – свідчить про системний розрив зв'язку «суходіл–вода» в межах

Львівщини, подолання якого залежить від переведення контролю у цифровий формат: інтеграції меж водного фонду в Публічну кадастрову карту та обмеження довільного трактування природоохоронних норм при відведенні прибережних земель.

Перспективи використання результатів дослідження. Практична цінність результатів найбільше проявляється для басейнових управлінь водних ресурсів і територіальних громад: на часі довести до кінця переведення меж ВЗ і ПЗС у цифровий формат та узгодити їх із Державним земельним кадастром. Логічним продовженням могла б стати регіональна платформа моніторингу земель водного фонду, що об'єднувала б супутникові дані, матеріали БУВРів і просторову інформацію громад, а також методика перерахунку меж охоронних зон у процесі землевпорядного проєктування. Окремого вирішення потребує усунення суперечностей між Водним і Земельним кодексами шляхом чіткого регламенту взаємодії екологічних служб і органів місцевого самоврядування, а також впровадження концепції «зелених коридорів» – відновлення природних буферів там, де заплави вже зазнали найбільшої антропогенної трансформації.

Література

1. Буцьких Д. О. Адміністративно-правова охорона водних ресурсів України: дис. ... на здобуття наук. ступеня доктора філософії : 081-Право / Д. О. Буцьких ; Дніпропетровський державний університет внутрішніх справ. Дніпро, 2023. 261 с.
2. Водний кодекс України, чинний, поточна редакція від 08.08.2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>
3. Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування. – Івано-Франківськ: Супрун В. П. 2022. – 212 с.
4. Дудоров О. О., Письменський Є. О. Порушення правил охорони вод: проблеми тлумачення і вдосконалення кримінального закону. *Українська поліцейстика: теорія, законодавство, практика*. 2024. № 2. С. 26–35. DOI: <https://doi.org/10.32782/2709-9261-2024-2-10-5>
5. Земельний кодекс України, чинний, поточна редакція від 15.02.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>
6. Кирилюк О.В., Кирилюк С.М. Геогідроморфологічне обґрунтування методики оцінки стану басейнових систем малих річок (на прикладі річок Гукова, Дерелюю та Виженки) : монографія. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т ім. Юрія Федьковича. 2023. 256 с.
7. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І., Гнітецький О., Хоменко С. Комплексний підхід до інтеграції водоохоронних зон у геоінформаційні системи міських кадастрів. *Технічні науки та технології*. 2024. № 4 (38). С. 325–335. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-325-335](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-325-335)
8. Коваленко І. І., Балакірева Ю. О. Деякі особливості правового режиму водоохоронних зон та прибережних захисних смуг. *Актуальні проблеми держави і права*. 2019. № 82. С. 85–90. DOI: <https://doi.org/10.32837/apdp.v0i82.40>
9. Краснова Ю. А., Кірін Р. С., Шеховцов В. В. Проблеми ефективності екологічного законодавства та їх вплив на господарську діяльність. *Право і суспільство*. 2025. № 2. С. 190–203. DOI: <https://doi.org/10.32842/2078-3736/2025.2.27>
10. Михайлик О. О. Інженерне облаштування водоохоронних зон як першочерговий захід збереження водних об'єктів. *Просторовий розвиток*. 2023. № 4. С. 103–110. DOI: <https://doi.org/10.32347/2786-7269.2023.4.103-110>
11. Морозюк Б.О., Мельник О.В. Дистанційний моніторинг руслових процесів р. Західний Буг у межах Волинської області. *Містобудування та територіальне планування*. 2020. № 73. С. 194–204. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2020.73.194-204>
12. Третяк В. М., Кравчук Т. Ю., Юсипенко О. М. Еволюція методології формування землекористування водоохоронних зон і прибережних смуг. *Збалансоване природокористування*. 2020. № 4. С. 42–49. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.4.2020.226621>
13. European Union Water Initiative Plus for Eastern Partnership (EUWI+). Official website. URL: <https://www.euwipluseast.eu/en/>
14. Fedoniuk T. P., Skydan O. V., Melnychuk T. V., Zymarioieva A. A., Pazych V. M. GIS-Based Landscape Management of the Uzh River Basin: A Strategy to Enhance River Water Quality. *Space Science and Technology*. 2023. 29. № 4 (143). P. 43–66. DOI: <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.043>
15. Winkler J., Ricica T., Hubacikova V., Koda E., Vaverkova M.D., Havel L., Zoltowski M. Water Protection Zones – Impacts on Weed Vegetation of Arable Soil. *Water* 2023. 15. 3161. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15173161>

Дата першого надходження статті до видання: 06.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

УДК 639.1.05 (477.42)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.14>

РОЗВИТОК МЕРЕЖІ ОБ'ЄКТІВ НАПІВВІЛЬНОГО УТРИМАННЯ МИСЛИВСЬКИХ ТВАРИН ЯК СКЛАДОВОЇ ОРГАНІЗАЦІЙНОЇ СТРУКТУРИ МИСЛИВСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ВИРОБНИЦТВА ЖИТОМИРСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Кратюк О.Л., Власюк В.П., Бондарчук Н.В.
Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир
deneshi_ks@ukr.net

Проведено комплексний ретроспективний і структурно-функціональний аналіз формування та сучасного стану мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин у взаємозв'язку з трансформацією організаційно-правових форм господарювання користувачів мисливських угідь Житомирської області за період 1995–2024 рр. Методологічну основу дослідження становлять статистичні матеріали, галузева звітність, проекти організації та розвитку вольєрного господарства. Доведено, що еволюція вольєрного господарства регіону мала чітко виражений поетапний характер. Початковий етап (1970–1990-ті рр.) визначався функціонуванням виключно державних підприємств, тоді як сучасний етап (після 2000 р.) характеризується стрімкою інтенсифікацією залучення приватного капіталу. Встановлено, що за останні три десятиліття загальна кількість об'єктів напіввільного утримання в області зросла у 6,8 рази (з 4 до 27 одиниць), а їх сумарна площа – у 7,3 рази (з 147,8 до 1072,4 га) з піком інтенсивності у 2010–2020 рр. Виявлено глибоку диспропорцію у розподілі вольєрного фонду між різними суб'єктами господарювання. З'ясовано, що лише 27,2% від загальної кількості користувачів мисливських угідь регіону (22 суб'єкти з 81) впроваджують технології напіввільного утримання мисливських тварин. Домінуюче положення за площею об'єктів посідають Товариства з обмеженою відповідальністю, які контролюють 58,1% (623,6 га) вольєрного фонду. Вагомий внесок забезпечують селянські (фермерські) господарства (21,3% площі), щоправда за рахунок одного великого об'єкта. Водночас державний сектор (ДП «Ліси України»), попри експлуатацію найбільшої кількості вольєрів (12 одиниць, або 44,4%), орієнтований на створення дрібних репродуктивно-селекційних комплексів середня площа яких становить 15,7 га, що сумарно забезпечує лише 17,5% площі. Громадські організації (зокрема УТМР), попри свою чисельність, мають найменшу питому вагу – 3,1% загальної площі. Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні наукового підґрунтя для оптимізації організаційних засад мисливствознавства та розробки регіональних програм сталого розвитку галузі. Перспективи подальших пошуків пов'язані з просторовим моделюванням мережі вольєрних господарств із урахуванням еколого-економічних чинників. *Ключові слова:* мисливське господарство, напіввільне утримання мисливських тварин, вольєр, організаційно-правові форми господарювання, користувачі мисливських угідь, сталий розвиток, Житомирська область.

Development of the Network of Semi-Free-Ranging Game Animal Enclosures within the Organizational Structure of Hunting Management in Zhytomyr Region. Kratiuk O., Vlasjuk V., Bondarchuk N.

A comprehensive retrospective and structural-functional analysis of the formation and current state of the network of semi-free-ranging game animal enclosures was conducted in relation to the transformation of the organizational and legal forms of hunting ground users in Zhytomyr Region during the period 1995–2024. The methodological framework of the study was based on official statistical data, sectoral reports, hunting management planning documents, enclosure development projects, archival materials, and scientific literature. The results demonstrate that the development of the regional enclosure network followed a distinct two-stage pattern. The initial stage (1970s–1990s) was characterized exclusively by the establishment and operation of enclosures by state-owned forestry and specialized hunting enterprises, whereas the contemporary stage (since 2000) has been marked by the rapid expansion of private investment in enclosure-based game management. During the last three decades, the number of semi-free-ranging game animal enclosures increased 6.8-fold (from 4 to 27), while their total area expanded 7.3-fold (from 147.8 to 1,072.4 ha), with the highest growth rate observed between 2010 and 2020. A pronounced imbalance in the distribution of enclosure resources among different categories of hunting ground users was identified. Only 27.2% of all hunting ground users in the region (22 out of 81) currently employ semi-free-ranging systems for game animal management. Limited liability companies occupy a dominant position, controlling 58.1% (623.6 ha) of the total enclosure area. A substantial contribution is also made by a single farming enterprise, accounting for 21.3% of the total enclosure area. Although the state sector (SFE «Forests of Ukraine») operates the largest number of enclosures (12 units, or 44.4% of the total), these facilities are generally small reproductive and breeding complexes with an average area of 15.7 ha, representing only 17.5% of the total enclosure area. Public organizations, including the Ukrainian Society of Hunters and Fishermen, despite their numerical predominance among hunting ground users, account for only 3.1% of the regional enclosure area. The findings provide a scientific basis for improving the organizational framework of hunting management and for developing regional strategies aimed at the sustainable development of enclosure-based game management. Future research should focus on the spatial optimization of the enclosure network using ecological, economic, and organizational criteria. *Key words:* hunting, semi-free-ranging hunting animal, enclosure, organizational and legal forms of management, hunting ground users, sustainable development, Zhytomyr Region.



© Кратюк О.Л., Власюк В.П., Бондарчук Н.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Ефективне функціонування мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин значною мірою залежить від організаційно-правової структури користувачів мисливських угідь та особливостей організації мисливсько-господарського виробництва. У зв'язку з реформуванням галузі та трансформацією форм господарювання виникає необхідність оптимізації структурно-функціональної організації мисливського господарства України на засадах поєднання екологічних і економічних принципів управління [1-4]. Як зазначають І.О. Щербина та І.В. Наконечний [5], сучасні організаційні форми ведення мисливського господарства мають бути спрямовані на ефективне відтворення мисливської фауни, збереження біорізноманіття та підвищення економічної ефективності галузі відповідно до принципів сталого розвитку. У цьому контексті особливої актуальності набуває дослідження закономірностей формування та розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин у взаємозв'язку з трансформацією організаційно-правових форм господарювання користувачів мисливських угідь.

Актуальність досліджень. В умовах адаптації мисливського господарства України до сучасних екологічних викликів, зокрема скорочення чисельності окремих видів мисливських тварин, деградації природних оселищ, фрагментації ландшафтів та посилення впливу кліматичних змін, особливого значення набуває впровадження ефективних організаційних моделей ведення мисливсько-господарського виробництва, орієнтованих на забезпечення збалансованого використання мисливських ресурсів, їх відтворення та збереження біорізноманіття [6-8]. За таких умов напіввільне утримання мисливських тварин розглядається не лише як технологія їх розведення, а й як важливий елемент організаційної структури мисливсько-господарського виробництва, що забезпечує виконання виробничих, природоохоронних, селекційних, рекреаційних та наукових функцій [9-11]. Поєднання цих підходів із міжнародним досвідом функціонування вольєрних господарств і центрів напіввільного утримання мисливських тварин [12] створює наукове підґрунтя для розвитку мережі таких об'єктів в Україні як одного з перспективних напрямів удосконалення мисливського господарства.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика досліджень відповідає Стратегії розвитку галузі мисливського господарства України на період до 2035 року [13]. Дослідження проводили на базі Поліського національного університету. Лівову частку матеріалу зібрано у рамках НДР кафедри експлуатації лісових ресурсів «Інвентаризація об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин Західного і Центрального Полісся України» (номер державної реєстрації 0117U002428; 2017–2019 рр.).

Згодом, подальший свій розвиток проблематика отримала у рамках НДР кафедри лісового та садово-паркового господарства «Мисливські ресурси лісових біогеоценозів Полісся України та суміжних територій» (номер державної реєстрації 0126U002516; 2026–2031 рр.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наявні публікації, присвячені організаційно-економічним засадам ведення мисливського господарства, здебільшого висвітлюють загальні питання реформування галузі, удосконалення системи управління, економічної ефективності використання мисливських ресурсів [14-17]. Тим часом регіональна структура організаційно-правових форм господарювання у мисливському господарстві висвітлюється несистематично й представлена лише в окремих наукових публікаціях [18-22]. При цьому просторово-часові аспекти розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин, їх зв'язок із трансформацією організаційно-правової структури користувачів мисливських угідь та вплив цих процесів на організацію мисливсько-господарського виробництва фактично залишаються поза увагою дослідників. Наявні наукові праці [23] мають переважно фрагментарний характер і не забезпечують цілісного уявлення про закономірності становлення регіональних мереж об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин, не враховують історичну трансформацію організаційно-правових форм користування мисливськими угіддями та не дають можливості оцінити вплив інституційних змін на темпи і масштаби розвитку вольєрного господарства. Саме тому виникає необхідність комплексного дослідження розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин із урахуванням організаційно-правових особливостей користувачів мисливських угідь, визначення основних тенденцій, етапів і закономірностей її формування, а також оцінювання перспектив подальшого розвитку як важливої складової сучасної організаційної структури мисливсько-господарського виробництва.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність значної кількості досліджень, присвячених біологічним, екологічним, технологічним та господарським аспектам напіввільного утримання мисливських тварин [10, 11, 24-29], питання формування та розвитку мережі відповідних об'єктів як складової організаційної структури мисливсько-господарського виробництва залишаються недостатньо дослідженими. Практично відсутні роботи, у яких розвиток вольєрного господарства розглядався б у взаємозв'язку з трансформацією організаційно-правових форм господарювання користувачів мисливських угідь, структурними змінами у системі управління мисливським господарством та особливостями територіальної організації мережі об'єктів напіввільного утримання мислив-

ських тварин. Не досліджено також регіональні закономірності формування вольтерної мережі, динаміку її розвитку, співвідношення ролі державного, громадського та приватного секторів у створенні й функціонуванні таких об'єктів, а також ступінь залучення різних категорій користувачів мисливських угідь до організації напіввільного утримання мисливських тварин. Для Житомирської області комплексні дослідження цього напрямку взагалі відсутні, що зумовило необхідність проведення ретроспективного аналізу розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин та оцінки впливу організаційно-правової структури користувачів мисливських угідь на сучасні тенденції її формування.

Новизна. Уперше для Житомирської області проведено комплексний аналіз розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин у взаємозв'язку з трансформацією організаційно-правових форм господарювання користувачів мисливських угідь.

Метою роботи є узагальнення основних тенденцій розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин у розрізі підприємств основних організаційно-правових форм господарювання на території Житомирської області.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Проведення дослідження дозволить комплексно оцінювати вплив трансформації організаційно-правових форм господарювання в межах галузі на формування, функціонування та розвиток мережі вольтерів, як важливого структурного елементу мисливсько-господарського виробництва, розвиток якого визначається змінами системи користувачів мисливських угідь. Запропонована методика дає змогу виявляти закономірності територіальної організації вольтерного господарства, оцінювати ефективність різних моделей його функціонування та визначати перспективні напрями оптимізації мережі. Отримані результати розширюють методологічний інструментарій досліджень у галузі мисливствознавства та можуть бути використані для проведення аналогічних досліджень в інших регіонах України, міжрегіональних порівнянь, обґрунтування стратегічних напрямів розвитку мисливського господарства, а також під час розробки регіональних і державних програм сталого управління мисливськими ресурсами.

Викладення основного матеріалу. *Об'єкт дослідження* – процес розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин. *Предмет дослідження* – просторово-часові аспекти організації напіввільного утримання мисливських тварин на території Житомирської області упродовж 1995–2024 рр.

Аналіз мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин проведено на основі матеріалів Державного агентства лісових ресурсів України (№ 2-тп «Мисливство»), Проектів організації та

розвитку вольтерного господарства підприємств Житомирської області, архівних матеріалів та літературних джерел.

Звіринець «Пилявин», створений графом Йозефом Потоцьким у 1900 році [30], став першим об'єктом напіввільного утримання мисливських тварин на території сучасної Житомирської області. Вольтер, за різними оцінками мав площу від 3000 до 5000 га [30–32] та проіснував до 1919 року [33].

До початку 1980-х років, за офіційними статистичними даними, на території Житомирської області об'єкти напіввільного утримання мисливських тварин були відсутні [34]. Водночас архівні матеріали та усні свідчення дають підстави стверджувати, що окремі вольтери могли функціонувати ще з другої половини 1970-х років. Зокрема, за наявними відомостями, першим можна вважати у 1974–1977 рр. будівництво вольтера площею 34,5 га на території Новоград-Волинського лісгоспзагу (ТОВ «МРК «Рись»)* (*у дужках сучасний користувач вольтера – прим. автора). Ймовірно 1980 року створено вольтер площею 28,0 га у Малинському лісгоспазі (ТОВ «Артемід ЛТД»). Загалом, встановлення точної дати заснування об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин пов'язано з низкою методологічних труднощів, зокрема, обмеженістю доступних історичних джерел та відсутністю уніфікованих критеріїв визначення моменту його створення, який може пов'язуватися з офіційним рішенням про організацію вольтера, початком чи завершенням будівельних робіт або першим вселенням мисливських тварин. На практиці ці етапи не завжди відбуваються у чіткій хронологічній послідовності, особливо щодо юридичного оформлення та офіційної реєстрації об'єктів, призначених для напіввільного утримання мисливських тварин.

Одним із найстаріших, нині функціонуючих об'єктів, дата створення якого підтверджена документально, є вольтер на території Явненського лісництва Баранівського надлісництва. Його було створено відповідно до рішення технічної ради Баранівського лісгоспзагу від 16 березня 1985 року на площі 56,2 га з метою розведення оленя плямистого (*Cervus nippon*) для подальшого розселення у мисливських угіддях України. Вольтер і дотепер у державній власності.

Важливим етапом розвитку напіввільного утримання мисливських тварин стало створення у 1983 році Державного мисливського господарства «В'юнки», в межах якого упродовж 1984–1986 рр. було побудовано одразу два вольтери різного функціоналу загальною площею 29,0 га [35].

Таким чином, на межі XX–XXI століть на території Житомирської області функціонувало п'ять вольтерів [34], усі вони були створені державними лісгосподарськими підприємствами або спеціалізованими державними мисливськими господарствами.

Трансформація організаційної структури мисливського господарства Житомирської області упродовж 1992–2024 рр. відбувалася під впливом глибоких економічних, інституційних та екологічних змін і мала чітко виражений поетапний характер, відображаючи еволюцію системи управління галуззю [36], що безпосередньо і відобразилося на формуванні мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин. Подальший її розвиток супроводжувався істотними змінами у структурі організаційно-правових форм господарювання користувачів вольтерів. У процесі реформування лісового та мисливського господарства більшість вольтерів перейшла у користування приватних суб'єктів господарювання. Зокрема, вольтер Новоград-Волинського ДЛМГ став власністю ТОВ «МРК «Рись», вольтер Малинського ЛГ – ТОВ «Артемід ЛТД», вольтер Радомишльського ЛМГ (61,0 га) – ТОВ «Клуб «КСК», а вольтер МГ «В'юнки» перейшов у користування до структур Українського товариства мисливців і рибалок, а згодом – до ТОВ «УТМР». Слід зазначити, що найбільші за площею вольтери Житомирської області були все-таки створені саме приватними мисливськими господарствами: ТОВ «КАМІА ПЛЮС» (500,0 га), СФГ «Земля Полісся» (228,0 га) та ТОВ «МК «Хантер» (40,0 га).

Динаміка розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин у Житомирській області свідчить про істотні зміни як у кількісній структурі, так і в розподілі їх площ між різними категоріями користувачів мисливських угідь (табл. 1). Упродовж 1995–2024 рр. загальна кількість об'єктів зросла з 4 до 27, тобто у 6,8 рази, тоді як

їх сумарна площа збільшилася з 147,8 до 1072,4 га, або у 7,3 рази. Найбільш інтенсивний етап розвитку припав на 2010–2020 рр., коли кількість вольтерів збільшилася з 9 до 29 одиниць, а їх площа – з 456,3 до 1132,7 га.

Аналіз організаційно-правової структури засвідчує суттєву трансформацію ролі окремих категорій користувачів мисливських угідь у розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин. Якщо у 1995 р. понад 80% загальної площі вольтерів припадало на державні лісгосподарські підприємства (нині – ДП «Ліси України»), тоді як частка Українського товариства мисливців і рибалок (УТМР) становила майже 20%, то вже з середини 2000-х років провідну роль у розвитку мережі почали відігравати інші користувачі мисливських угідь. У 2005 р. приватні мисливські господарства експлуатували лише два вольтери площею 240,8 га (53,0% загальної площі), тоді як у 2015–2020 рр. їх частка стабілізувалася на рівні 85,8–86,2%.

Водночас внесок державних лісгосподарських підприємств у загальну площу об'єктів поступово зменшувався. Незважаючи на збільшення кількості вольтерів із трьох у 1995 р. до дванадцяти у 2024 р., зокрема, у 2012 році на території ДП «Білокорівське ЛГ» побудовано найбільший серед ДЛГ у Житомирській області вольтер площею 70,5 га, їх сумарна площа зросла лише з 118,8 до 187,9 га, а частка у загальній площі скоротилася з 80,4% до 17,5%. Це свідчить про переважне створення порівняно невеликих за площею об'єктів у державному секторі. Аналогічна тенденція простежується й щодо УТМР, де за відносно стабільної кількості вольтерів

Таблиця 1

Розподіл кількості (шт.) та площі (га) об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин Житомирської області між різними суб'єктами господарювання

Рік	УТМР	ДП «Ліси України»	Інші користувачі	Разом
1995	1*	3	-	4
	29,0 / 19,6**	118,8 / 80,4	- / -	147,8
2000	1	4	-	5
	29,0 / 13,9	179,8 / 86,1	- / -	208,8
2005	1	5	2	8
	29,0 / 6,4	184,9 / 40,6	240,8 / 53,0	454,7
2010	-	4	5	9
	- / -	123,9 / 27,2	332,4 / 72,8	456,3
2015	2	9	10	21
	18,0 / 1,6	138,1 / 12,5	944,3 / 85,8	1100,4
2020	3	9	17	29
	18,7 / 1,6	138,1 / 12,2	975,9 / 86,2	1132,7
2024	3	12	12	27
	18,7 / 1,7	187,9 / 17,5	865,8 / 80,8	1072,4

Примітки. * – кількість об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин, шт.; ** – площа об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин / частка від загальної площі, (га / %);

(1–3 одиниці) їх площа залишалася незначною та скоротилася у структурі регіональної мережі з 19,6% до 1,7%.

Особливо показовим є розвиток мережі серед приватних користувачів мисливських угідь, до яких належать Товариства з обмеженою відповідальністю (ТОВ), Громадські організації (ГО) та інші суб'єкти господарювання. Саме ця категорія забезпечила основний приріст площ об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин, що свідчить про активізацію приватних інвестицій у мисливське господарство та зміну організаційної моделі розвитку галузі. Якщо у 2005 р. на одного такого користувача припадало в середньому близько 120,0 га вольєрної площі, то у 2024 р. середня площа одного об'єкта становила понад 72,0 га, що вказує на поступове збільшення кількості вольєрів за одночасного зменшення їх середніх розмірів.

Мережа об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин Житомирської області сформувалася за участю користувачів мисливських угідь різних організаційно-правових форм господарювання та свідчать про істотну нерівномірність розподілу вольєрів між різними суб'єктами господарювання.

Станом на 01.01.2025 р. у Житомирській області функціонувало 27 вольєрів загальною площею 1072,4 га (табл. 2), які перебували у користуванні 22 суб'єктів господарювання, що становить 27,2% від загальної кількості користувачів мисливських угідь області. Отже, три чверті користувачів (72,8%) не використовують напіввільне утримання мисливських тварин як складову ведення мисливського господарства (табл. 2).

Аналіз структури власності свідчить, що найбільш поширеною організаційно-правовою формою користувачів мисливських угідь є громадські організації, які представлені 43 суб'єктами господарю-

вання (53,1%). Проте лише 8 із них експлуатують вольєри, загальна площа яких становить 32,9 га, або лише 3,1% площі всіх об'єктів напіввільного утримання області. Найбільшим представником цієї категорії є Українське товариство мисливців і рибалок, яке експлуатує три вольєри загальною площею 18,7 га, що становить 56,8% площі вольєрів громадських організацій, але лише 1,7% загальної площі вольєрного фонду області. Слід зазначити, що обласна та 8 районних організацій УТМР керуються єдиним Статутом [37].

Домінуюче положення за площею об'єктів займають ТОВ. За наявності 33 суб'єктів господарювання цієї організаційно-правової форми лише шість підприємств створили вольєри, однак їх сумарна площа досягла 623,6 га, або 58,1% від загальної площі вольєрів області. У середньому на одне господарство, яке здійснює напіввільне утримання мисливських тварин, припадає 104,0 га вольєрної площі, що майже у 38 разів перевищує аналогічний показник для громадських організацій (4,1 га). Це свідчить про значно вищий рівень концентрації земельних, матеріально-технічних та фінансових ресурсів у приватному секторі.

Важливу роль у розвитку мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин відіграє все ж таки ДП «Ліси України». Юридично-державний сектор представлений лише одним суб'єктом господарювання. Загалом державні лісгосподарські підприємства експлуатують 12 вольєрів, або 44,4% їх загальної кількості. Вольєри функціонують у 9 із 12 філій (філія «Баранівське ЛМГ» володіє 3 вольєрами, а філія «Лугинське ЛГ» – 2), які розташовані у межах Житомирської, однак їх сумарна площа становить лише 187,9 га (17,5%). Середня площа одного державного вольєра дорівнює 15,7 га, що свідчить про орієнтацію державного сектору на створення

Таблиця 2

Розподіл кількості (шт.) та площі (га) вольєрів між користувачами мисливських угідь Житомирської області різних організаційно-правових форм господарювання (станом на 01.01.2025 р.)

№ з/п	Організаційно-правові форми господарювання	Кількість суб'єктів господарювання, шт	Кількість вольєрів, шт	Площа вольєрів, га	Частка від загальної площі вольєрів, %	Примітка
1.	ДП (Державне підприємство «Ліси України»)	1	12	187,9	17,5	вольєри побудовано у 9 філіях з 12
2.	ГО (Громадська організація)	43	8	32,9	3,1	
	– у тому числі «УТМР»	1	3	18,7	1,7	
3.	ТОВ (Товариство з обмеженою відповідальністю)	33	6	623,6	58,1	
4.	ПП (Приватне підприємство)	2	-	-	-	
5.	СФГ (Селянське (фермерське) господарство)	1	1	228,0	21,3	
	Разом	81	27	1072,4	100,00	

переважно невеликих репродукційних або селекційних вольєрів.

Окремої уваги заслуговує СФГ «Земля Полісся», яке, маючи лише один вольєр, забезпечує 228,0 га, або 21,3% загальної площі об'єктів напіввільного утримання області. За площею цей об'єкт поступається лише сукупності вольєрів товариств з обмеженою відповідальністю та є другим найбільшим окремим вольєром у регіоні.

Головні висновки. Встановлено, що формування сучасної мережі відбувалося у два основні етапи: початковий (1970–1990-ті рр.), пов'язаний зі створенням вольєрів державними лісгосподарськими та спеціалізованими мисливськими підприємствами, та сучасний (після 2000 р.), який характеризується домінуванням приватного сектору у її розвитку. Показано, що розширення мережі супроводжувалося істотною трансформацією організаційно-правової структури користувачів мисливських угідь,

тоді як рівень їх залучення до організації напіввільного утримання мисливських тварин залишається недостатнім, що свідчить про наявність значного потенціалу для подальшого розвитку цього напрямку. Отримані результати поглиблюють уявлення про закономірності формування мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин та можуть бути використані як наукове підґрунтя для вдосконалення організаційних засад функціонування мисливського господарства та розробки регіональних програм його розвитку.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним напрямом подальших досліджень ми вбачаємо розробку наукових засад просторової оптимізації мережі об'єктів напіввільного утримання мисливських тварин з урахуванням організаційно-правових, природно-ресурсних та еколого-економічних чинників їх функціонування.

Література

1. Бондаренко В.Д., Різун Е.М. Актуальні питання стану і ведення мисливського господарства в Україні та можливі напрями їх вирішення. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2016. Вип. 14. С. 180–184.
2. Дейнека А.М., Бурмас В.Р. Стан і перспективи розвитку мисливського господарства. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Вип. 23.13. С. 78–94.
3. Новицький В.П., Голубєв М.І. Управління мисливськими ресурсами агроландшафтів України та зарубіжжя: господарсько-правові аспекти. *Наукові доповіді НУБіП України* (електр. журн.) 2016. № 5(62). Режим доступу: <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-62-4-2016>
4. Шейгас І.М. Особливості та перспективи розвитку мисливського господарства України у період реформування галузі. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2006. Вип. 16.3. С. 47–52.
5. Щербина І.О., Наконечний І.В. Еколого-економічні шляхи оптимізації структурно-функціональної організації системи мисливського господарства України. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2016. Вип. 14. С. 697–702.
6. Муравйов Ю.В. Дослідження витрат і джерел надходжень від ведення мисливського господарства Львівської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т.29, № 4. С. 50–52.
7. Проект моделі реформування і розвитку мисливського господарства України. Жовтень 2015. [Електронний ресурс] / М.О. Мироненко та ін. URL: <https://www.slideshare.net/enpifleg/ss-65435331>.
8. Прус Ю.О. Аналіз сучасного стану ресурсів мисливських господарств України. *Збірник наукових праць ТДАТУ імені Дмитра Моторного (економічні науки)*. 2023. № 3(49). С. 155–168.
9. Волох А.М. Напіввільне вирощування диких тварин як альтернатива традиційному тваринництву та мисливству. *V Всеукр. з'їзд екологів з міжнар. участю* : зб. наук. праць. Вінниця, 2015. С. 149.
10. Волох А.М. Вирощування диких копитних : монографія. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 400 с.
11. Камінецький В.К., Бабіч О.Г., Смаголь В.М. Екологічні та господарські аспекти напіввільного розведення диких копитних (на прикладі спеціалізованих підприємств Державного управління справами Президента України): монографія. Миронівка : Миронівська друкарня, 2011. 154 с.
12. Хоецький П.Б., Новак А.А., Похалюк О.М. Світовий досвід ведення вольєрного мисливського господарства. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Т.5, № 3. С. 32–37.
13. Стратегія розвитку галузі мисливського господарства України на період до 2035 року: Розпорядження КМУ від 21.05.2025 р. № 489-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/489-2025-%D1%80#n12>
14. Гонта О., Музика В. Європейський досвід ведення мисливського господарства: перспективи для України. *Проблеми і перспективи економіки та управління*. 2019. № 3(19). С. 113–125.
15. Завадських Г.М. Європейський досвід та розвиток мисливського господарства України. *Збірник наукових праць ТДАТУ імені Дмитра Моторного (економічні науки)*. 2023. № 3(49). С. 148–154.
16. Музика В., Гонта О. Оцінювання сучасного стану розвитку мисливського господарства України. *Галицький економічний вісник*. 2020. № 6(67). С. 19–22.
17. Савченко Т. Методологічне забезпечення державного управління розвитком мисливського господарства. *Науковий вісник: Державне управління*. 2021. № 3(9). С. 163–174.
18. Виговська В.В., Музика В.В., Малей Е.Б. Сучасний стан мисливського господарства Чернігівської області: проблеми та шляхи їх вирішення. *Науковий вісник Полісся*. 2019. № 1(17). С. 118–125.
19. Кратюк О.Л., Власюк В.П., Воробей В.П. Екологічні аспекти організації мисливсько-господарського виробництва Житомирської районної організації УТМР. *Таврійський науковий вісник*. 2025. № 142. С. 291–299.
20. Муравйов Ю.В. Дослідження розподілу мисливських угідь Львівської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т.29, № 4. С. 72–74.

21. Соболевська О.О. Формування доходів мисливських господарств Запорізької області. *Науковий вісник ЛНУ ветеринарної медицини та біотехнологій. Серія «Економічні науки»*. 2021. № 23(97), С. 41–47.
22. Яворська А.В. Економіко-статистичні аспекти ведення мисливського господарства в Житомирській області. *Економічний аналіз*. 2013. Том 13. С. 409–414.
23. Катиш С.В. Дичерозведення на території лісостепової і степової зон України (на прикладі Полтавської і Запорізької областей). *Біологічні системи*. 2016. Т.8, вип. 2. С. 219–227.
24. Білий В.В. Еколого-гігієнічні аспекти функціонування вольєра для розведення дикої свині. *Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість*. 2006. Т.30. С. 278–281.
25. Бугрин Л.М., Партика Т.В., Похалюк О.М. Елементи технології створення пасовищ для оленя лісового в умовах вольєрного розведення. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т.28, № 2. С. 37–40.
26. Євтушевський М.Н. Мисливські тварини України на волі та в вольєрах : монографія. Черкаси : Вертикаль, 2012. 376 с.
27. Кратюк О.Л. Особливості впливу напіввільного утримання мисливських тварин на діелектричні показники сосни звичайної. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т.29, № 8. С. 43–45.
28. Кратюк О.Л. Трансформація ценоморф трав'яно-чагарничкового ярусу лісових екосистем у вольєрах Західного і Центрального Полісся. *Екологічні науки*. 2020. № 5(32). С. 103–111.
29. Пепко В.О. Санітарно-гігієнічна оцінка ґрунтів та джерел водопостачання на етапі створення вольєрного господарства. *Таврійський науковий вісник. Серія «Сільськогосподарські науки»*. 2019. Вип. 107. С. 217–222.
30. Dyakowski B. O dawnych łowach i dawnej zwierzynie. Warszawa : Wydawnictwo M. Arcta, 1925. 212 s.
31. Sokalski R. Łowiectwo na Wołyniu. *Łowiec*. 1910. № 21. S.250–252.
32. Sokalski R. Łowiectwo na Wołyniu. *Łowiec*. 1910. № 24. S.284.
33. Кратюк О.Л. Становлення вольєрного господарства на території Центрального Полісся. *Natural sciences: history, the present time, the future, EU experience : International scientific and practical conference*. (Wloclawek, Republic of Poland, 27–28 September, 2019). Wloclawek, 2019. С. 85–86.
34. Кратюк О.Л., Гузій А.І., Власюк В.П., Бездітко Л.В. Характеристика вольєрів для ратичних *Artiodactyla* на території Житомирської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т.28, № 2. С. 50–53.
35. Косенко О.М., Вергун М.Г. Фауна – живе багатство Житомирщини. Житомир, 2001. 146 с.
36. Кратюк О.Л., Власюк В.П. Еколого-економічні аспекти трансформації організаційної структури користувачів мисливських угідь Житомирської області. *Таврійський науковий вісник*. 2026. № 149. Частина 1. С. 384–393.
37. Статут Громадської організації «Українське товариство мисливців і рибалок»: [затв. Позачерговим з'їздом УТМР від 25.03.2024 р., протокол № 1]. Київ, 2024. 33 с. URL: <https://utmr.org.ua/pro-nas/statut>

Дата першого надходження статті до видання: 09.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЗВОРОТНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЗВ'ЯЗОК ЯК ФАКТОР СПІВВІДНОШЕННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТА КОЛЕКТИВНОГО В ПОПУЛЯЦІЙНИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Волошин В.С.

Приазовський державний технічний університет
вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com

У роботі запропоновано концептуальний підхід щодо дослідження взаємозв'язку між колективною координацією та індивідуальною автономією в екосистемах на основі біологічних популяцій в сенсі аналізу структури інформаційних потоків і механізмів зворотного інформаційного зв'язку (ЗІЗ). Вихідною передумовою дослідження є положення про те, що адаптивність будь-якої спільноти, як структурної частини екосистеми, що впливає на неї, визначається не лише обсягом інформаційного обміну між її членами, а й характером організації зворотних інформаційних зв'язків. Сформульовано гіпотезу, згідно з якою рівень індивідуалізації визначається не абсолютною інтенсивністю інформаційного обміну, а часткою персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку в популяції. Аналіз відомих досліджень показав, що високий рівень інформаційного обміну може породжувати принципово різні форми організації залежно від ступеня персоналізації комунікації. Показано, що зі зростанням складності інформаційної мережі виникають колективні властивості, які не можуть бути пояснені лише індивідуальними характеристиками окремих членів екосистеми. Особливу увагу приділено так званому «мурашиному парадоксу», відповідно до якого низька індивідуалізація може поєднуватися з високою колективною ефективністю, тоді як в умовах більшості з інших екосистем, висока індивідуалізація забезпечує значні творчі та інноваційні можливості її суб'єктів, але підвищує витрати на координацію спільних дій. Зроблено висновок про існування фундаментального компромісу між колективною ефективністю та індивідуальною автономією, який визначається структурою інформаційних потоків усередині біологічної екосистеми. Практичним результатом роботи є передбачене розділення двох інформаційних контурів: деперсоналізованого контуру колективної координації та персоналізованого контуру індивідуального розвитку, що лягло в основу розробленої соціально-біонічної моделі адаптивності суспільства. Показано, що використання принципів організації мурашиних суперорганізмів у сфері координації спільних дій за одночасного збереження високого рівня людської індивідуалізації створює передумови для підвищення ефективності управління, інноваційності та стійкості екосоціальних систем. *Ключові слова:* соціальність екосистеми, зворотний інформаційний зв'язок, індивідуалізація, колективний інтелект, інформаційні потоки, соціально-біонічна модель, адаптивні екосистеми.

Feedback as a Factor in the Relationship between Individualism and Collectivism in Population Ecosystems. Voloshyn V.

This paper proposes a conceptual approach to investigating the relationship between collective coordination and individual autonomy in ecosystems based on biological populations through the analysis of information-flow structures and feedback mechanisms. The study is founded on the premise that the adaptability of any community, as a structural component of an ecosystem that influences its functioning, is determined not only by the volume of information exchange among its members but also by the way feedback processes are organised.

A hypothesis is formulated according to which the degree of individualisation is determined not by the absolute intensity of information exchange but by the proportion of personalised feedback within a population. An analysis of existing studies demonstrates that a high level of information exchange can give rise to fundamentally different forms of organisation depending on the degree of communication personalisation. It is shown that, as the complexity of an information network increases, collective properties emerge that cannot be explained solely by the individual characteristics of separate members of the ecosystem.

Particular attention is paid to the so-called “ant paradox”, according to which a low level of individualisation may coexist with high collective efficiency, whereas in most other ecosystems a high degree of individualisation provides substantial creative and innovative capacities for their agents but increases the costs of coordinating collective actions.

The study concludes that a fundamental trade-off exists between collective efficiency and individual autonomy, a trade-off determined by the structure of information flows within a biological ecosystem. The practical outcome of the research is the proposed separation of two information circuits: a depersonalised circuit of collective coordination and a personalised circuit of individual development. This distinction forms the basis of the developed socio-bionic model of societal adaptability. It is demonstrated that applying the organisational principles of ant superorganisms to the coordination of collective actions, while simultaneously preserving a high degree of human individualisation, creates conditions for enhancing governance effectiveness, innovativeness, and the resilience of eco-social systems. *Key words:* ecosystem sociality, feedback, individualisation, collective intelligence, information flows, socio-bionic model, adaptive ecosystems.



Постановка проблеми. Сучасні дослідження переважно зосереджені на вивченні інтенсивності інформаційного обміну або механізмів колективної поведінки окремих частин біологічних екосистем. Значно менше уваги приділяється ролі персоналізації зворотного інформаційного зв'язку як чинника формування індивідуальної автономності та колективної координації. Актуальним є пошук універсальних підходів до опису взаємозв'язку між колективними та індивідуальними формами організації таких екосистем.

Актуальність дослідження. Стрімке зростання складності сучасних соціальних екосистем потребує нових підходів до поєднання ефективної координації та збереження індивідуальної свободи, як засобів резистивності таких екосистем. Дослідження інформаційних механізмів, які лежать в основі колективної поведінки біологічних популяцій, відкриває можливості для створення більш адаптивних моделей суспільного розвитку екосистем, які їх поєднують.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Результати роботи можуть бути використані для дослідження колективного інтелекту, розвитку адаптивних систем управління, проектування соціальних мережевих структур та вдосконалення моделей суспільної координації в умовах збереження екологічних балансів у сучасному світу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будь-яка популяція живих організмів, як невід'ємна частина екосистеми, в якій вони існують через обмін інформацією між особинами [1, 2, 3], і завдяки якій вони впливають на зовнішнє середовище. Основні канали передачі інформації серед живих істот можуть включати: хімічні сигнали (феромони); акустичні сигнали; зорові сигнали; тактильні контакти; електромагнітні сигнали; мовні комунікації. Водночас принципово важливим є не лише факт передачі інформації, а й наявність механізмів її повернення до джерела у вигляді реакції адресата [1]. Саме цей процес ми називатимемо зворотним інформаційним зв'язком (ЗІЗ). У технічній кібернетиці зворотний зв'язок є фундаментальною властивістю керованих систем [4]. У біології аналогічний механізм визначає координацію поведінки особин всередині популяції [1, 5, 6].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо дослідженим залишається питання впливу ступеня персоналізації зворотного інформаційного зв'язку на співвідношення між колективною ефективністю та індивідуальною автономією серед особин у різних екосистемах.

Наукова новизна. Полягає у висуненні гіпотези про визначальну роль частки персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку у формуванні рівня індивідуалізації, та розробленні концептуальної соціально-біонічної моделі, що поєднує механізми колективної координації й індивідуальної автономії в межах однієї екосистеми.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід створює основу для міжвидового порівняльного аналізу інформаційної організації біологічних екосистем за допомогою єдиної системи концептуальних показників.

Викладення основного матеріалу.

В якості екосистеми, що досліджується, розглядаємо біологічну популяцію в оточенні її інформаційного супроводу, завдяки якому поведінка популяції взаємодіє з навколишнім середовищем шляхом створення зворотного інформаційного зв'язку.

Методика дослідження. Розглянемо соціально-біонічну модель поведінки популяції та окремої її особи через структуру мережі інформаційних взаємодій між особинами (рис. 1). Допустимо, що кожна особина має можливість спілкування з іншими особинами. Тоді популяцію можна представити у вигляді графа, де вершини – це особи, а ребра – активні взаємодії між ними. Чим більше активних зв'язків, тим вище колективність поведінки.

На це в моделі показує коефіцієнт колективності, як відношення поточної кількості активних зв'язків між особинами $L(t)$ до максимально можливої кількості зв'язків для даної популяції L_{max} у часовому вимірі t

$$C(t) = L(t) / L_{max}. \quad (1)$$

Фактичний коефіцієнт колективності вимірюється за станом мережі в діапазоні $0,0 < C(t) < 1,0$. Якщо дві особи регулярно взаємодіють, це вважається за один повний зв'язок.

Для визначення альтернативного коефіцієнту індивідуалізації особи запропонуємо інший умовний параметр (I) такий, що його діапазон також обирається в межах $0,0 \leq I \leq 1,0$, де $I = 0$ означає, що особина практично не здатна діяти автономно, а значення $I = 1,0$ показує на те, що особина здатна приймати складні незалежні рішення та може діяти всупереч груповій поведінці. Показник I може оцінюватися, зокрема, через такі властивості, як автономність прийняття рішень (A), поведінкову варіабельність (V), здатність до навчання (L), рівень соціальної незалежності і когнітивної складності (Q)

$$I = \frac{A + V + L + Q}{4}. \quad (2)$$

Для біологічних систем важливим є механізми поведінкової синхронізації, як основа для прояви колективних дій, оскільки колонія мурах, зграя птахів, косяк риб або людська спільнота можуть мати однакову кількість зв'язків, але принципово різний рівень синхронізації поведінки. Тому третім базовим параметром вважаємо коефіцієнт синхронізації $S(t)$ ($S = 0$ – повна неузгодженість дій, $S = 1$ – повна синхронізація). У цілому, для популяції з N особин

$$S(t) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \cos(\varphi_i - \varphi_j), \quad (3)$$

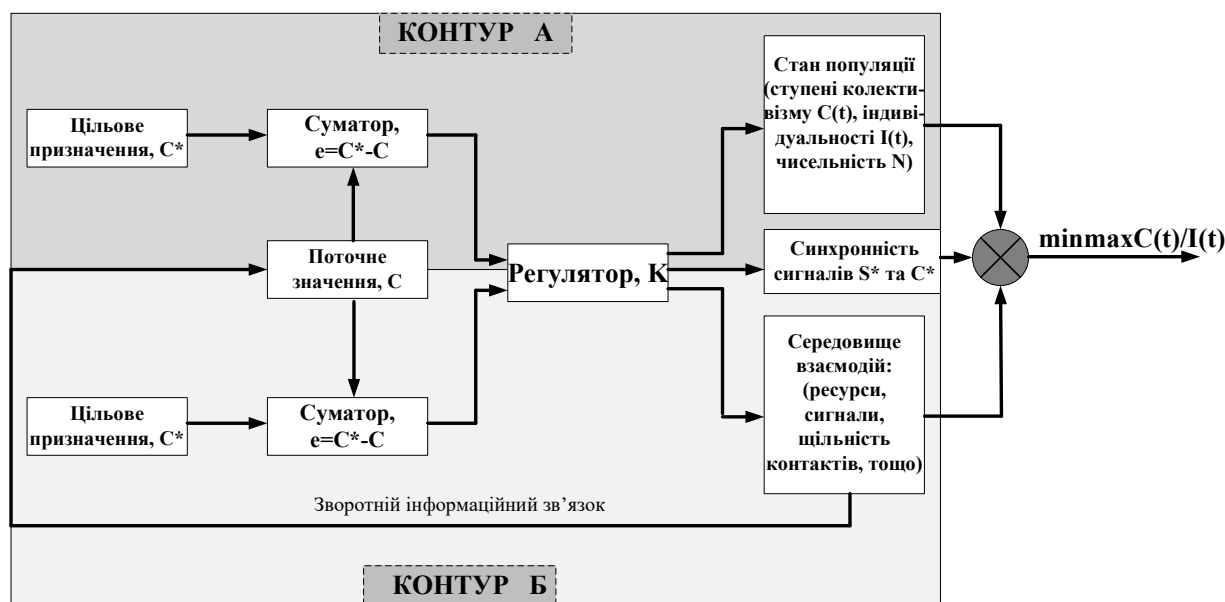


Рис. 1. Типова схема соціально-біонічної моделі взаємодій всередині біологічної екосистеми з урахуванням зворотного інформаційного зв'язку

де ϕ – фаза поведінкового стану, відповідно i – i та j – j особин.

Для оцінки узгодженості автономних рішень особин потрібний показник синхронізації $S_i = 1 - \sigma_i$, де $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_N (I_i - \bar{I})^2}$, а I_i – індивідуальність особини, $\bar{I}$ – середня індивідуальність популяції. Значення $S_i = 1$ відповідає узгодженості індивідуального рішення в групі, $S_i = 0$ – це хаотичні рішення.

На підставі досвіду досліджень лабораторії *Ofer Feineman* Інституту Вайцмана [5], для визначення показника зворотного інформаційного зв'язку (ЗІЗ) пропонується умовний коефіцієнт (F_S), що має синхронізовану комплексну залежність:

$$F_S = C \cdot R \cdot D \cdot S. \quad (4)$$

Він може оцінюватися як ефективність ЗІЗ з урахуванням синхронізації через кількість синхронізованих каналів комунікації ($S = 0,0 - 1,0$), так і швидкість синхронізованої передачі сигналу ($R = 0,0 - 1,0$), індивідуальну адресність повідомлень ($D = 0,0 - 1,0$), складність змісту повідомлень ($C = 0,0 - 1,0$).

Наприклад, складність повідомлення (C) оцінюється кількістю різних типів сигналів: для мурах це приблизно 25–50 феромонних сигналів, для людини – десятки тисяч слів, граматики, абстракції. Тому у мурах умовно $C \approx 3,3 - 4,0$, а для людини приймаємо $C \approx 0,9 - 1,0$. Швидкість відповіді (R), це час між сигналом і реакцією. Наприклад, для мурах швидкість зворотного зв'язку складає секунди або хвилини [3], а для людини – частки секунди [7]. Адресність повідомлення (D) пока-

зує рівень спрямованості повідомлення до конкретної особини.

Якщо в популяції N особин і кожна може взаємодіяти з будь-якою іншою, то $L_{max} = \frac{N(N-1)}{2}$. У схемі зворотного інформаційного зв'язку, що показана на рис. 1: C^* – задане цільове значення колективності, наприклад, $C^* = 0,7$ означає, що бажано мати 70 % від максимально можливої кількості зв'язків. Помилка управління для популяції в моделі визначається, як

$$e(t) = C^* - C(t). \quad (5)$$

Якщо $e(t) > 0$, це означає недостатність колективності для популяції, а $e(t) < 0$ означає надто велику колективність. Позначимо коефіцієнт посилення для регулятора співвідношення $e(t)/C(t)$ як K . Він визначає, наскільки міцно система реагує на помилку. Показник керуючого впливу від K в моделі означимо як $u(t)$. Це може бути збільшення кількості загального інформаційного ресурсу, посилення інформаційного обміну або радіусу комунікації, введення кооперативних стимулів. Таке управління безпосередньо впливає на кількість інформаційних зв'язків. Тоді у загальному вигляді рівняння

$$\frac{dL}{dt} = \gamma u - \delta L \quad (6)$$

визначимо, як швидкість зміни кількості зв'язків, де γ – ефективність керуючого впливу, δ – швидкість руйнування зв'язків, u – керуючий сигнал.

Замикання зворотного зв'язку формує регулятор K і керуючий сигнал для впливу синхронізації на зворотній інформаційний зв'язок показує на спів-

відношення базового рівня синхронізації і колективності ($S^* i C^*$) з поточними їх рівнями. Запишемо $u = K(C^* - C) + K_S(S^* - S)$, де K_S – коефіцієнт посилення синхронізації. Тоді (6) перетворюється у

$$\frac{dL}{dt} = \gamma \left[K \left(C^* - \frac{L}{L_{\max}} \right) + K_S (S^* - S) \right] - \delta L \quad (7)$$

і відображає повне рівняння для замкнутої екосистеми з синхронізованим негативним зворотним інформаційним зв'язком, як вплив на зовнішнє середовище. Тут γ – здатність популяції реагувати на стимули (велике γ – зв'язки виникають швидко, малі значення γ – популяція інертна). δ – характеризує забування і розпад взаємодій (велике значення δ – це зв'язки нестабільні, обмаль δ – взаємодії довгогострокові). K – характеризує міцність управління. Якщо K занадто велике, можливі коливання в системі управління (рис. 2, поз 1), якщо K – помірне, система плавно виходить на результат (рис. 2, поз 2).

Результати дослідження.

Припустимо, що система бажає підтримувати 80% можливих зв'язків ($C^* = 0,8$).

Випадок 1. Реальне значення для системи $C = 0,5$. Тоді помилка $e = 0,8 - 0,5 = 0,3$ – позитивна. Регулятор K збільшує $u > 0$ і кількість зв'язків починає зростати. Рівень колективності L починає зростати.

Випадок 2. Реальне значення для системи $C = 0,95$. Помилка $e = 0,8 - 0,95 = -0,15$ негативна. Отримуємо $u < 0$ – це показує, що створення нових зв'язків пригнічується, а старі зв'язки поступово зникають через член δL . Колективність поведінки зменшується, але підвищується ступінь індивідуальності кожної особини.

Водночас, ефективність синхронізованого зворотного інформаційного зв'язку напряму залежить від кількості синхронізованих каналів комунікацій між особинами (рис. 3).

У такій системі зворотний зв'язок передає інформацію про стан популяційної мережі ланцюжком

$$L(t) \rightarrow C(t) \rightarrow e(t) \rightarrow u(t) \rightarrow L(t) \quad (8)$$

Тобто система постійно вимірює ступінь зв'язності популяції, порівнює її з потрібним рівнем завдяки ЗІЗ і змінює умови взаємодії таким чином, щоб їх мережа самоналагоджувалася до потрібного рівня організації. Саме такі умови існування зворотного інформаційного зв'язку в популяції. При цьому коефіцієнт індивідуальної поведінки будь якої особини вимірюється як $I = 1 - C$. У контурі зворотного інформаційного зв'язку управління фактично змінює число зв'язків L . Через це автоматично змінюються обидва коефіцієнти за формулами

$$L \uparrow \Rightarrow C \uparrow \Rightarrow I \downarrow \text{ та } L \downarrow \Rightarrow C \downarrow \Rightarrow I \uparrow. \quad (9)$$

Тому систему можна регулювати за одним з цих коефіцієнтів, як взаємопов'язаних один до одного й того ж самого процесу – ступені включеності особин у спільну мережу взаємодій.

Максимальна адаптивність в популяції (див. рис. 3) виникає не при максимальному колективізмі чи індивідуалізмі, а поблизу їхнього балансу за наявності високої синхронізації та якісного зворотного інформаційного зв'язку. Саме цей висновок логічно розширює вихідну соціально-біонічну модель до наступної первинної гіпотези щодо взаємодії індивідуального та колективного в поведінці як єдиної особини, так і в поведінці групи таких же особистостей, з урахуванням специфіки зворотного інформаційного зв'язку між особинами, чи групами. Тут вочевидь коректною може стати така формула:

«Індивідуалізація визначається не величиною загального зворотного інформаційного зв'язку, а часткою індивідуально адресованого ЗІЗ».

Таким чином, високий ЗІЗ може існувати як у мурашнику, так і в людському суспільстві. Різниця полягає у характері його розподілу. У мурах ЗІЗ

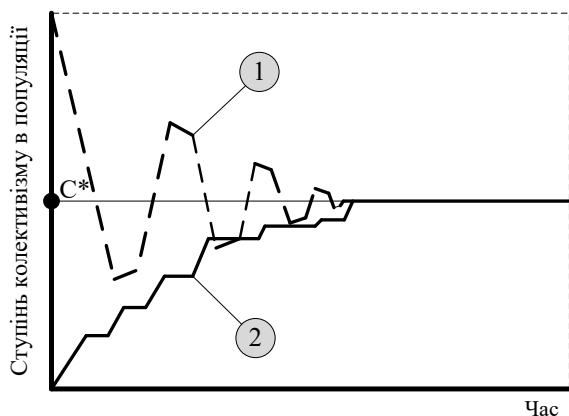


Рис. 2. Динаміка впливу ступеня колективізму за міцністю усвідомленого та неусвідомленого управління

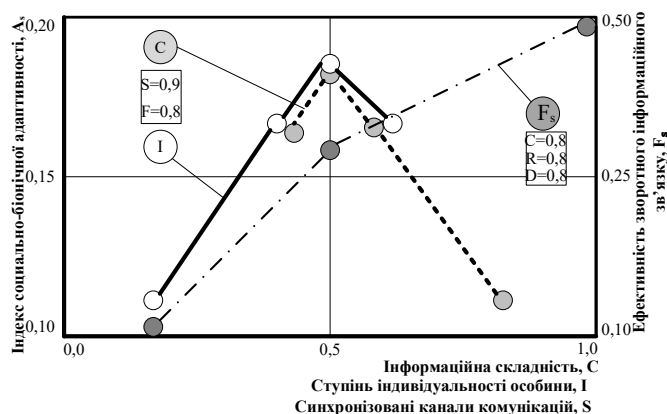


Рис. 3. Узагальнений індекс соціально-біонічної адаптивності популяції зі ЗІЗ у екосистемі

переважно колективний, а у людей *ЗІЗ* переважно індивідуальний та відокремлений.

Початково позначимо: P – частка персоналізованого *ЗІЗ*. Тоді можна показати, що коефіцієнт індивідуалізації може виникати і через механізми *ЗІЗ*

$$I = k \cdot P \cdot F \quad (10)$$

де: k – нормувальний показник.

Для порівняльного аналізу запропонуємо евристичну спрощену формальну модель поведінки, яка отримана емпіричним шляхом на підставі досліджень [8, 9]

$$I = 10^{1-\alpha} \cdot P \cdot (F)^\alpha \quad (11)$$

де вже F – відображає загальний рівень *ЗІЗ*, а P – частка індивідуалізованої комунікації при ньому, показник $\alpha \approx 1,0 - 1,5$ прийнятий таким чином, щоб підкреслити сильніший вплив соціальної складності за лінійної залежності.

Ми звернемося до так званого мурашиного парадоксу. Саме тут міститься найбільш цікава частина концепції, що викладається в роботі.

Мурахи в межах колонії (або навіть у суперорганізмі) мають низьку індивідуалізацію, високу колективну ефективність. Навпаки, люди забезпечені високим рівнем індивідуалізації та індивідуальною ефективністю.

Дослідження лабораторії *Ofer Feinerman* Інституту Вайцмана [5] показали, що за умов обмеженої комунікації (≈ 50 сигналів) великі групи мурах

можуть ефективніше вирішувати окремі задачі колективної навігації, ніж людські групи аналогічного масштабу зі значно ширшими комунікаційними можливостями. Проте окремі люди перевершують окремих мурах на індивідуальному рівні.

Це підтверджує, що еволюція створила два різних шляхи досягнення адаптивності: через колективний «інтелект» (на прикладі мурах) і через індивідуальний інтелект (на прикладі людської спільноти). Тому об'єктивність твердження, що «Еволюційна історія живих систем може бути описана як безперервний пошук балансу між колективною координацією та індивідуальною автономією» не підлягає сумніву. Але ж рівень цього балансу визначається структурою інформаційних потоків у будь якій біологічній популяції та характером зворотного інформаційного зв'язку між її складовими, заради впливу на зовнішнє середовище.

Для визначення міста та ролі *ЗІЗ* у моделях розвитку біологічних популяцій розглянемо деякі експериментальні результати, що наведені в науковій літературі, які стосуються предмету нашого дослідження (табл. 1). Дані цих досліджень здатні ілюструвати не тільки головну мету цих експериментів, але й надати деякі побічні результати, щодо співвідношення колективного та індивідуального в інформаційних контактах найбільш відомих популяцій.

За експериментом [10], автори показали, що колективне «поле зору» групи збільшується з числом учасників і навіть логарифмічне збільшення радіуса колективного зондування дає різке прискорення про-

Таблиця 1

Вихідні дані щодо деяких поведінкових експериментів, згідно літературних джерел

Назва експерименту і адреса публікації	Початкові дані для експерименту
«Навігаційний лабіринт» [10]	Штучний лабіринт із випадково розміщених перешкод площі 70×50 см; випадково розташовані кубічні перешкоди; мурахи виду: <i>Paratrechina longicornis</i> транспортували вантаж до гнізда. Вимірювані параметри швидкість знаходження маршруту, ефективність навігації, кількість помилкових маневрів, вплив комунікації між особинами, залежність успіху від складності середовища. Основні результати: час проходження лабіринту; щільність перешкод; довжину маршруту; ефективність навігації.
«Лідер без авторитету» [11]	Модель: мала частина зі 100 особин знає правильний напрямок, але більшість особин не «поінформована». Поінформовані особини знали правильний напрямок, решта не знали напрямку і просто підтримували згуртованість групи. У групі ніхто не знає, хто саме володіє інформацією, тому немає явного авторитету. Вовки, примати, люди
«Конфлікт сигналів» [12]	Модель: риба пропонувала альтернативні напрями руху. У групі були особини з інформацією та особини без інформації. Вивчався механізм кворуму. Риба одночасно отримувала: власну інформацію про напрямок; соціальний сигнал від косяка. Сигнал А: «пливи сюди», сигнал Б: «група рухається туди». Вимір: наскільки часто виникає нестандартна поведінка. Саме це буде одним із індикаторів індивідуалізації.
«Примати і люди – конфлікт соціального та особистого сигналів» [13]	Умови експерименту: людина бачить правильну відповідь. Група людей демонструє неправильну відповідь. Отже сигнал А: власне сприйняття; сигнал Б: соціальний консенсус.
«Конфлікт сигналів + колективне рішення» [14]	Умови експерименту: кожній рибі демонстрували різну якість інформації. Вивчалася: чи буде рішення групи відповідати середньому значенню індивідуальних оцінок.

ходження лабіринту (високий F – інтенсивний обмін інформацією, при дуже низькому P – майже відсутня адресність сигналів пояснюється низькою індивідуалізацією всередині колонії).

За експериментом [11] встановлено, що 5–10 % поінформованих особин здатні цільовим образом переорієнтувати 90–95 % неінформованих. Це показує, що високий інформаційний потік сам по собі не гарантує конформізм. Важливою стає структура передачі інформації, зокрема, механізми ЗІЗ.

За експериментом [12] автори виявили деякі порогові значення між F та I . Для наших оцінок це означає, що між індивідуальним та соціальним сигналами існує нелінійна точка переключення, що можна інтерпретувати як перехід між низьким та високим I .

Розглянемо систему «примати – люди» [13]. Формальний результат експерименту показує, що приблизно третина рішень була конформною, ще дві третини залишалися незалежними. Саме це можна умовно трактувати як емпіричний вимір визнаного показника індивідуалізації I для людської системи.

У експерименті типу «Конфлікт сигналів + колективне рішення» [14] автори встановили, що точність колективного рішення зростала з розміром групи. Для великих груп консенсусне рішення було суттєво точнішим за рішення окремої особини, або обмежених груп. Особливо важливо, що група не просто голосувала більшістю. Виникав процес суцільної інтеграції інформації між особинами, але без ЗІЗ.

Таким чином, вже існуючі окремі експерименти показують на результати, які не суперечать запропонованій гіпотезі, де вирішальним фактором для колективності/індивідуальності може бути не абсолютний обсяг інформаційного обміну, а ступінь його

персоналізації. Саме таких даних сьогодні бракує в єдиному міжвидовому дослідженні. Інтегральний результат цих та інших досліджень, що ілюструють це, показано в таблиці 2.

З цього випливає конкретний результат, що стосується запропонованої гіпотези (табл. 3).

Зростання чисельності мурах в 100 разів підвищує функціональність майже у 1000 разів (рис. 4). Саме тому, великі мурашині колонії здатні будувати дороги, вирощувати грибні ферми, підтримувати складний поділ праці. При такому ж зростанні чисельності риб у косяку їх колективний інтелект підвищується у 150 разів, його вистачає для уникнення хижаків, синхронних рухів, пошуку їжі, але без накопичення знань. У приматів, за рахунок появи соціального навчання і передачі знань між поколіннями рівень індивідуалізму вищий – зростання більш ніж 250 разів, при зростанні чисельності зграї у 1000 разів. З урахуванням здатності до накопичення знань попередніх поколінь, інтелект окремої людини майже не змінюється у короткому історичному часі, але змінюється мережа. Навіть опосередкований вимір інтелекту людини (див. рис. 4) показує на добрий проксі для колективної когнітивної продуктивності, навіть незважаючи на певну невизначеність індивідуалізму в межах малих груп ($\alpha \approx 1,15$). Але зі збільшенням населення у 1000 разів це дає розрахункове майже 4000-кратне зростання колективної інтелектуальної потужності.

Але ж це тільки концептуальна модель: для різних видів особин значення I визначатиметься у ширших діапазонах і по-різному (успішність полювання, швидкість пошуку їжі, інновації, обсяг знань тощо). Найбільш перспективна форма гіпотези, що нада-

Таблиця 2

Опосередковані результати експериментів які описані в роботах [1-5] і стосуються проблеми ЗІЗ

Система	Загальний інформаційний обмін F	Рівень персоналізації, P	Рівень автономності, I
Мурахи	Високий	дуже низький	Низька
косякові риби	Середній	Низький	Середня
вовки/примати	Високий	Середній	Висока
Люди	дуже високий	дуже високий	дуже висока

Таблиця 3

Підсумок деяких експериментів із цільовим призначенням до мети даної роботи

Вид популяції	Назва експерименту	Аналітичний результат
Мурахи	№ 1 «Навігаційний лабіринт»	логарифмічне збільшення колективного зондування різко підвищує швидкість навігації
Косякові риби	№ 2 «Лідер без авторитету»	групове рішення стає точнішим за індивідуальне
Узагальнені тваринні групи (Cousin)	№ 2 «Лідер без авторитету»	5–10 % інформованої меншості достатньо для керування всією групою
Косякові риби	№ 3 «Конфлікт сигналів»	існує поріг кворуму, після якого відбувається швидкий перехід до консенсусу

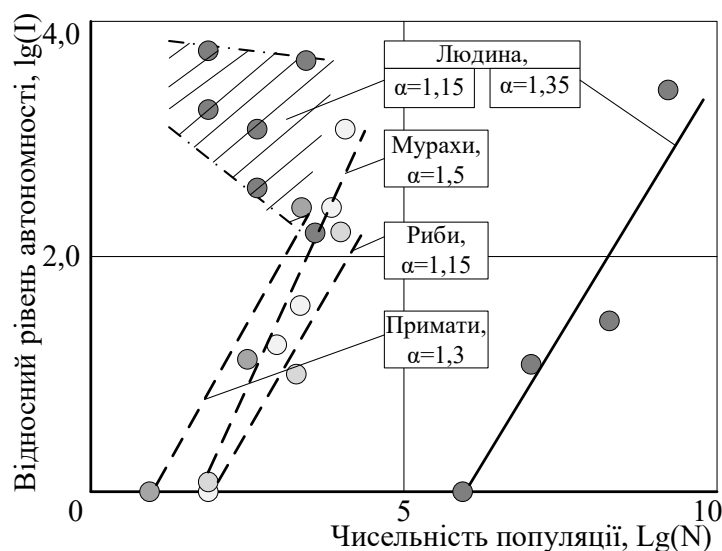


Рис. 4. Динаміка зміни рівнів індивідуальності для певних популяцій в процесі їх взаємодії зі зовнішнім середовищем

ється, і яка відповідає експериментальному підтвердженню, має вигляд:

«Із зростанням частки персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку в популяції зростає поведінкова автономність (індивідуалізація) окремих особин, але водночас зменшується швидкість формування єдиного колективного рішення».

Прийнята гіпотеза, як робоча теоретична основа, дозволяє зробити нетривіальний висновок: *проблема людського суспільства полягає не в надлишку індивідуалізму чи колективізму як таких, а в неоптимальній структурі інформаційних потоків між людьми в колективі.*

У межах запропонованої гіпотези звернемося до соціально-біонічної моделі адаптивного суспільства (див. рис. 1). Основні результати, що показує така модель, зведемо до поведінкової соціально-біонічної інтерпретації (таблиця 4). Центральний узагальнений принцип такої моделі сформулюємо так: *«в оптимальному стані суспільство не придушує індивідуальність, а мінімізує витрати на її координацію через ефективні системи зворотного інформаційного зв'язку».*

Важливіший механізм у запропонованій гіпотезі базується на принципі двоконтурного інформаційного обміну, коли, наприклад, людське суспільство в біонічній моделі повинно мати два незалежні інформаційні контури (див. рис. 1).

Контур А, це колективна координація, де інформація максимально деперсоналізована без механізмів ЗІЗ. Наприклад будь які штучні мережі: транспорт; енергетика; логістика; міське планування. Цей контур повинен працювати за логікою типового мурашника.

Контур Б, це індивідуальний розвиток за рахунок максимально розвинуеного персоналізованого зво-

ротного інформаційного зв'язку. Наприклад: освіта; наука; творчість; підприємництво; особистісний розвиток. Цей контур працює, наприклад, за логікою людської індивідуальності.

Таке співвідношення може існувати і для мурашиної колонії, тільки з акцентом «навпаки».

Ці положення легко узагальнити у вигляді аргументованої таблиці порівняння колективних і індивідуальних здібностей для двох популяцій з діаметрально протилежними початковими даними (табл. 5).

Основний результат моделі в біонічному аспекті для людини може мати таке формулювання.

«Ефективність суспільства максимізується тоді, коли деперсоналізований інформаційний обмін використовується для координації спільних дій, а персоналізований зворотний інформаційний зв'язок використовується для розвитку індивідуальної поведінкової автономії».

Головною ідеєю такої, що впливає з соціально-біонічної моделі для людської спільноти, є не наслідування мурахам як колективістичним істотам, а перенесення в людське суспільство їхнього механізму дешевої та швидкої координації, зберігаючи при цьому високий рівень індивідуалізації, який забезпечується персоналізованим зворотним інформаційним зв'язком. Саме така комбінація теоретично дозволяє одночасно досягати високої інноваційності людських спільнот і високої ефективності колективних дій.

Головні висновки і перспективи використання результати дослідження.

1. Запропоновано концептуальний підхід до аналізу біологічних екосистем через структуру зовнішніх інформаційних потоків, у якій взаємодія між колективною координацією та індивідуальною автоно-

Таблиця 4

Основні положення поведінкової соціально-біонічної інтерпретації для деяких популяцій

Принцип суперорганізму мурах	Соціально-біонічна інтерпретація для людини	Очікуваний ефект
Сигнал важливіший за відправника	Оцінюється зміст інформації, а не статус людини	Зниження культу авторитетів
Колективне рішення виникає з локальних взаємодій	Більшість рішень приймається на нижчому рівні організації	Зменшення бюрократії
Відсутність єдиного центру управління	Поліцентричне управління суспільством	Підвищення стійкості системи
Постійний зворотний зв'язок	Безперервний моніторинг наслідків рішень	Швидка корекція помилок
Феромонне підсилення успішних маршрутів	Автоматичне масштабування успішних практик	Прискорення інновацій
Зникнення неефективних маршрутів	Автоматичне припинення неефективних програм	Економія ресурсів
Простота локальних правил	Прості та зрозумілі суспільні процедури	Зниження транзакційних витрат
Розподілене виявлення проблем	Кожен громадянин є джерелом інформації	Підвищення адаптивності
Паралельний пошук рішень	Заохочення багатьох альтернатив одночасно	Підвищення інноваційності
Гнучкий розподіл функцій	Тимчасові ролі замість жорстких статусів	Зростання соціальної мобільності

Таблиця 5

Узагальнюючі дані для соціально-біонічної моделі людської спільноти та мурашиної суперколонії

Параметр	Мурашиний суперорганізм	Сучасне людське суспільство	Запрограмовано соціально-біонічною моделлю
Загальний інформаційний обмін (F)	Дуже високий	Дуже високий	<i>Дуже високий</i>
Персоналізація (P)	Дуже низька	Дуже висока	<i>Диференційована</i>
Автономність (I)	Низька	Висока	<i>Висока</i>
Швидкість колективних рішень	Дуже висока	Середня	<i>Висока</i>
Інноваційність	Низька	Висока	<i>Висока</i>
Стійкість системи	Дуже висока	Середня	<i>Дуже висока</i>
Вартість координації	Дуже низька	Висока	<i>Низька</i>
Залежність від лідерів	Майже відсутня	Висока	<i>Низька</i>
Адаптивність до кризи	Висока	Середня	<i>Висока</i>
Баланс колективізму та індивідуалізму	Колективізм	Індивідуалізм	<i>Динамічний баланс</i>

мією особин описується через параметри зворотного інформаційного зв'язку (F) та індивідуалізації (I).

2. На підставі аналізу експериментальних даних показано, що однаковий або навіть високий рівень інформаційного обміну може породжувати принципово різні форми організації – від колективного інтелекту мурашиних колоній до індивідуалізованих людських спільнот.

3. Висунуто гіпотезу, що рівень індивідуалізації визначається не загальним обсягом інформаційного обміну, а часткою персоналізованого зворотного інформаційного зв'язку в популяції.

4. На основі запропонованої гіпотези сформульована соціально-біонічна модель, у якій колективність та індивідуальність між особинами є взаємопов'язаними станами мережі взаємодій, що регулюються механізмом зворотного інформаційного зв'язку.

5. Модель показує, що керування інформаційною зв'язністю в межах екосистеми забезпечує самоналаштування балансу між кооперацією та індивідуальною адаптацією. Це дає підстави розглядати інформаційну зв'язність, як самостійний екологічний фактор стійкості, адаптивності та інноваційного розвитку сучасних соціоекосистем.

Література

1. Edward O. Wilson, Bert Hölldobler. Dense Heterarchies and Mass Communication as the Basis of Organization in Ant Colonies. *Trends in Ecology & Evolution*, Vol. 3, No. 3, 1988, pp. 65–68. DOI: 10.1016/0169-5347(88)90018-3.
2. Hölldobler B., Wilson E. O. *The Superorganism*. New York: W.W. Norton, 2009. 522 p. <https://wnorton.com/books/The-Superorganism>
3. Dreyer T., Feinerman O. et al. Comparing Cooperative Geometric Puzzle Solving in Ants versus Humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 122(1), 2025. DOI: 10.1073/pnas.2414274121.
4. Wiener N. *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*. MA: MIT Press. Cambridge, 2019. 352 p. DOI: <https://doi.org/10.7551/mitpress/11810.001.0001>
5. Feinerman O., Korman A. Individual versus Collective Cognition in Social Insects. 2017. Vol. 220, No. 1. Pp. 73–82. DOI: 10.1242/jeb.143891. Доступ: <https://doi.org/10.1242/jeb.143891>
6. Rosenberg L., Willcox G., Schumann H., et al. Towards Collective Superintelligence: Amplifying Group IQ Using Conversational Swarms. *Proceedings of the 26th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2024)*. Angers, France, 2024. Vol. 1. Pp. 759–766. DOI: 10.5220/0012687500003690.
7. Di Caro G., Dorigo M. AntNet: Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 1998. Vol. 9. Pp. 317–365. DOI: 10.1613/jair.530.
8. Волошин В. С., Данилова Т. Г. Про один порівняльний критерій по відношенню до певних екосистем, людини і створених нею систем штучного інтелекту. *Екологічні науки*. № 59. Київ, 2025.
9. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Ентропійний фактор у прояві властивостей органічних і неорганічних систем на межі співіснування людини та навколишнього середовища. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. № 52, Дніпро, 2025. С. 151-157
10. Gelblum A., Fonio E., Rodeh Y., Korman A., Feinerman O. Ant collective cognition allows for efficient navigation through disordered environments. *eLife*, Vol. 9, 2020. DOI: 10.7554/eLife.55195
11. Couzin I.D., Krause J., Franks N.R., Levin S.A. Effective leadership and decision-making in animal groups on the move. *Nature*, 433(7025), 2005. pp. 513–516. DOI: 10.1038/nature03236
12. Ward A.J.W., Sumpter D.J.T., Couzin I.D., Hart P.J.B., Krause J. Quorum decision-making facilitates information transfer in fish shoals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008. DOI: 10.1073/pnas.0710344105
13. Asch, S. E. Opinions and Social Pressure. *Scientific American*. 1955. Vol. 193, No. 5. Pp. 31–35. DOI: 10.1038/scientificamerican1155-31.
14. Sumpter D.J.T., Krause J., James R. et al. Consensus decision making by fish. *Current Biology*, 18(22), 2008, pp. 1773–1777. DOI: 10.1016/j.cub.2008.09.064.

Дата першого надходження статті до видання: 02.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ОСОБЛИВОСТІ ЕКОЛОГІЧНИХ ВЗАЄМОДІЙ МІЖ ПРЕДСТАВНИКАМИ ВІДДІЛУ МОХОПОДІБНІ ТА ПАТОГЕННИМИ ЛЕПТОСПІРАМИ В УМОВАХ ПЕРЕЗВОЛОЖЕНИХ ЗЕМЕЛЬ

Гулай В.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет
пр. Університетський, 8, 25006, м. Кропивницький
vit.gulay@gmail.com

У статті представлені результати вивчення екологічних взаємовідносин представників відділу Мохоподібні з патогенними лептоспірами (*Leptospira interrogans*) серологічного варіанту *Icterohaemorrhagiae*. Актуальність роботи зумовлена недостатньою вивченістю екології збудника лептоспірозу та факторів, що визначають тривалість його збереження у природних водно-болотних екосистемах. Метою дослідження було оцінити вплив прижиттєвих виділень та продуктів розкладу двох видів мохів, а саме дрепанокладуса гачкуватозігнутого (*Drepanocladus aduncus* (Hedw.) Warnst.) та дрепанокладуса Зентднера (*Drepanocladus sendtneri* (Schimp. ex H. Müll.) Warnst.) на культури патогенних лептоспір *in vitro*. В лабораторних умовах отримано змиви з листків та відмерлих залишків, а також дифузати з ризоїдів зазначених видів мохів. Щільність популяцій *L. interrogans* визначали методом прямого підрахунку клітин після 24-годинної експозиції. Рослинний матеріал відбирали на перезволожених ділянках заплави р. Інгул у околицях с. Велика Северинка Кропивницького району Кіровоградської області. Алелопатична активність рослин відносно патогенних лептоспір випробовувалась у розведенні 1:1000.

Встановлено, що всі досліджені рослинні виділення проявляли пригнічуючий вплив на культури патогенних лептоспір. Найбільш виражений ефект для *D. aduncus* спостерігався під дією листових змивів, тоді як для *D. sendtneri* – ризоїдних виділень. Продукти розкладу відмерлих рослин також знижували щільність культур, однак їх дія була менш вираженою порівняно з прижиттєвими виділеннями. Отримані результати свідчать про наявність у досліджених видів мохів біологічно активних речовин, здатних пригнічувати розвиток патогенних лептоспір. Це дає підстави розглядати зазначені рослини як перспективний компонент природних механізмів самоочищення водно-болотних екосистем та потенційний об'єкт для розроблення екологічно безпечних підходів до санації природних і антропогенно трансформованих перезволожених територій від збудників лептоспірозу. **Ключові слова:** мохи, дрепанокладус гачкуватозігнутий, дрепанокладус Зентднера, патогенні лептоспіри, прижиттєві виділення, продукти розкладу.

Peculiarity of ecological interactions among representatives of Bryophyta and pathogenic leptospires in the conditions of wetlands territories. Hulai V.

The article presents the results of a study on the ecological interactions between representatives of the division Bryophyta and pathogenic leptospires *Leptospira interrogans* serovar *Icterohaemorrhagiae*. The relevance of the study is determined by the insufficient knowledge of the ecology of the causative agent of leptospirosis and the environmental factors affecting its persistence in natural wetland ecosystems. The aim of the study was to evaluate the effects of living exudates and decomposition products of two moss species, *Drepanocladus aduncus* (Hedw.) Warnst. and *Drepanocladus sendtneri* (Schimp. ex H. Müll.) Warnst., on cultures of pathogenic leptospires *in vitro*. Under laboratory conditions, leaf washings, rhizoid diffusates, and aqueous extracts of decomposed plant residues were prepared from the studied moss species. Plant material was collected from waterlogged sites in the floodplain of the Inhul River near the village of Velyka Severynka, Kropyvnytskyi District, Kirovohrad Region, Ukraine. The allelopathic activity of the moss extracts against pathogenic leptospires was evaluated at a dilution of 1:1000. The density of *L. interrogans* populations was determined by direct cell counting after 24 hours of incubation. All tested plant extracts exhibited an inhibitory effect on pathogenic leptospiral cultures. The strongest inhibitory activity of *D. aduncus* was observed for leaf washings, whereas rhizoid diffusates showed the highest activity in *D. sendtneri*. Extracts obtained from decomposed plant material also reduced leptospiral population density, although their effect was less pronounced than that of living plant exudates. The obtained results indicate the presence of biologically active compounds in the studied moss species capable of suppressing the growth of pathogenic leptospires. These findings suggest that the investigated mosses may represent an important component of the natural self-purification mechanisms of wetland ecosystems and may serve as promising sources of biologically active compounds for the development of environmentally safe approaches to the sanitation of natural and anthropogenically transformed waterlogged ecosystems contaminated with leptospirosis pathogens. **Key words:** moss, *Drepanocladus aduncus*, *Drepanocladus sendtneri*, pathogenic leptospires, lifetime secretates, substances of decomposed dead leaves.

Постановка проблеми. Роль мікроорганізмів збудників інфекційних захворювань людей, домашніх, сільськогосподарських та диких видів тварин, які можуть завдавати відчутної шкоди. Одним у природі та практичній діяльності людини є надзвичайно важливою. Особливу групу становлять



з таких видів мікроорганізмів є збудник лептоспірозу *Leptospira interrogans*. Переважно водний шлях передачі цієї інфекції зумовлює необхідність вивчення особливостей екології цього виду мікроорганізмів в умовах перезвожених земель, як однієї з можливих стацій поширення.

Актуальність дослідження. Тривалість перебування збудників лептоспірозу в об'єктах зовнішнього середовища, вивчені недостатньо. У зв'язку з цим актуальним є дослідження особливостей екологічних взаємодій патогенних лептоспир з чисельними представниками біоти, а саме з різноманітними видами рослин, які здатні істотно впливати на формування угруповань водних та ґрунтових мікроорганізмів. Біохімічні речовини виділені рослинами в навколишнє середовище можуть як стимулювати, так і пригнічувати розвиток окремих груп мікроорганізмів або не проявляти вираженої дії.

Серед значної кількості мохів, що зростають в умовах західного Лісостепу України фоновими видами є дрепанокладус гачкуватозігнутий (*Drepanocladus aduncus* (Hedw.) Warnst.) та дрепанокладус Зентднера (*Drepanocladus sendtneri* (Schimp. ex H. Müll.) Warnst.) [3].

Нами поставлено мету з'ясувати та оцінити вплив на популяції *L. interrogans* прижиттєвих виділень, а також продуктів розкладу залишків вказаних видів мохів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Результати досліджень були частиною науково-дослідної роботи Інституту ветеринарної медицини НААН України за державним завданням № 0106U000385 "Вивчити біоценотичні зв'язки патогенних лептоспир в навколишньому середовищі, особливості перебігу лептоспірозу в сучасних умовах ведення тваринництва та розробити інтегральну систему захисту тварин від лептоспірозу"

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Випадки захворювання на лептоспіроз реєструються на усіх континентах, окрім Антарктиди. Щороку випадки захворювання реєструють понад у 1 млн. осіб, з них близько 60 тис. становлять летальні наслідки. Патогенні лептоспири здатні паразитувати не лише в людському організмі, але й у диких та свійських тваринах, що належать до різних систематичних груп. Також тварини можуть бути природними резервуарами збудника захворювання, забезпечуючи його збереження та поширення. Попри значну кількість досліджень екології лептоспир у різних регіонах світу [4–7], інформація щодо їхніх взаємодій із рослинними компонентами водно-болотних екосистем залишається обмеженою.

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

Найбільш недостатньо вивченими є природно-вогнищеві особливості лептоспірозу, що усклад-

нює або, інколи, унеможливорює здійснення загальних оздоровчих заходів на значних територіях держави.

Новизна. В результаті проведених досліджень виявлено закономірності впливу біохімічних виділень типових представників фітоценозів боліт та перезвожених земель, а саме мохів видів дрепанокладус гачкуватозігнутий (*D. aduncus* (Hedw.) Warnst.) та дрепанокладус Зентднера (*D. sendtneri* (Schimp. ex H. Müll.) Warnst.) на культури патогенних лептоспир серовару *Icterohaemorrhagiae*. Встановлено негативну реакцію спирохет на змиви з листків та ризоїдів зазначених видів мохів та речовин, що отримані з їх відмерлих решток.

Матеріали та методи досліджень.

Досліджували вплив продуктів розкладу та прижиттєвих виділень дрепанокладусів гачкуватозігнутого та Зентднера на культури спирохет *Leptospira interrogans* серовару *Icterohaemorrhagiae*.

Рослини для досліджень відбирали з природних стацій зростання – перезвожених земель у заплаві р. Інгул в околицях с. Велика Северинка Кропивницького району Кіровоградської області.

Змиви з листків живих мохів одержували імітацією невеликого дощу. Виділення з ризоїдів отримували з відібраних екземплярів мохів, які утримували у скляних ємностях з водою для загоювання пошкоджених ділянок коренів. За умов природної зміни температури та коливань освітленості рослини утримувались впродовж 5 діб. Після цього відбирали проби розчину для біотестування [1].

Після завершення вегетації відмерлі залишки збирались у природних умовах. В лабораторії до наважки взятого при природній вологості матеріалу додавали дистильовану воду у співвідношенні 1:10 за масою. Екстрагований матеріал не подрібнювався і зберігався при температурах +12...+16°C. Через 5 діб з ємності відбирались проби для проведення біотестів [4].

У експериментах використовували культури музейних штамів *L. interrogans* серовару *Icterohaemorrhagiae*. При відборі культур основна увага приділялась відсутності явищ самоаглютинації та лізису клітин, а також достатній кількості лептоспир в середовищі – в межах $3 - 10 \times 10^6$ /см³ [2].

Щільність популяцій *L. interrogans* у дослідних та контрольних зразках визначали методом прямого підрахунку лептоспир у певному об'ємі.

Для проведення експериментальних досліджень з метою встановлення характеру і ступеня впливу прижиттєвих виділень та продуктів розкладу вегетативних частин мохів на *L. interrogans* формувались дві групи зразків: дослідні та контрольні. Дослідні зразки містили 0,4 мл стерильного розведеного розчину з біологічно-активними виділеннями рослин в який вносили 0,1 мл культур патогенних лептоспир. Контрольні зразки містили аналогічні співвідношення стерильної дистильованої води та культур

лептоспир. Для усунення сторонньої мікрофлори проводилась холодна стерилізація змивів та водних витяжок рослин методом фільтрації через целюлозні фільтри з діаметром пор $\leq 0,2$ мкм.

Алелопатична активність рослин відносно патогенних лептоспир випробовувалась нами у розведенні 1:1000.

Інокуляти культур спірохет відбирались з однієї «материнської» культури, що забезпечувало однаковий початковий вміст спірохет у досліді та контролі. Зберігались зразки при кімнатній температурі $+18...+22^{\circ}\text{C}$ в умовах лабораторії. Через 24 години визначався та порівнювався вміст спірохет у піддослідних групах зразків. В процесі аналізу та інтерпретації результатів досліджень використовували критерії оцінки характеру та ступеня впливу рослинності на патогенних лептоспир [2].

Результати досліджень та їх обговорення.

Аналіз даних одержаних в результаті проведених досліджень дає підставу стверджувати, що прижиттєві виділення та продукти розкладу відмерлих частин обох видів мохів здійснюють пригнічуючий вплив на популяції *L. interrogans* (табл. 1, 2).

В найбільшій мірі пригнічення культур патогенних лептоспир спостерігалось в результаті впливу листових змивів д. гачкуватозігнутого – щільність популяції спірохет у дослідних зразках становила 52,8% від контролю (100%), в той час як ризоїдні

дифузати проявляли дещо менший вплив – 68,7%. Речовини отримані з відмерлих решток зазначеного виду мохів зменшили початкову щільність мікроорганізмів до 74,7% від контрольної.

Ризоїдні дифузати д. Зентднера також негативно впливали на патогенних лептоспир. Аналіз результатів експерименту дозволяє стверджувати, що щільність культури становила 61,4% від контролю. Листкові змиви цього виду мохів проявляли пригнічуючий вплив на спірохет, в дещо меншій мірі, ніж ризоїдні дифузати і щільність культури зменшилася до 70,6% від контрольної. Щодо речовин, які були отримані з відмерлих залишків д. Зентднера, то вони в найменшій мірі пригнічували культури патогенних лептоспир, щільність яких становила відповідно 72,3% від контролю [Рис. 1].

Головні висновки. Встановлено, що отримані прижиттєві виділення мохів видів дрепанокладус гачкуватозігнутий та Зентднера пригнічують помірного ступені *in vitro* культури патогенних лептоспир серологічного варіанту *Icterohaemorrhagiae*. Речовини, що були виділені з відмерлих частин, вказаних видів рослин також проявляли токсичний вплив на спірохет, але в меншому ступені. Ділянки перезвожених земель, на яких ростуть представники зазначених видів мохів є несприятливими для тривалого існування патогенних лептоспир *Leptospira interrogans* серовару *Icterohaemorrhagiae*.

Таблиця 1

Вплив виділень дрепанокладуса гачкуватозігнутого на культури патогенних лептоспир серотипу *Icterohaemorrhagiae* ($P<0,001$)

Статистичні показники	Щільність культури патогенних лептоспир, млн. кл / мл					
	кореневі виділення		листові змиви		опад	
	дослід	контроль	дослід	контроль	дослід	контроль
1	21,5	35,0	25,5	38,5	21,5	49,5
2	24,0	33,5	23,5	26,5	22,5	46,5
3	25,0	40,0	22,0	37,5	24,0	44,0
4	22,5	41,0	25,0	27,0	26,5	43,5
5	24,0	38,0	18,0	27,5	23,0	39,5
6	15,5	31,0	21,5	39,5	35,0	42,5
7	18,5	29,5	25,5	40,0	32,5	36,5
8	15,0	27,5	26,0	36,0	35,0	33,5
9	16,0	27,0	15,5	41,0	38,0	30,0
10	19,5	32,5	18,0	36,0	33,5	34,5
11	28,0	33,0	13,5	42,5	36,0	51,5
12	24,5	35,0	16,0	39,0	39,5	53,0
13	31,5	33,0	12,5	36,5	35,0	48,0
14	25,0	27,0	13,5	38,5	37,5	45,5
15	29,0	29,0	11,0	37,0	38,5	42,0
M	22,6	32,8	19,1	36,2	31,9	42,7
σ	5,0	4,5	5,3	5,1	6,5	6,8
m	1,3	1,2	1,4	1,4	1,7	1,8
t	5,8		8,6		4,4	

Таблиця 2

**Вплив виділень дрепанокладуса Зентднера на культури патогенних лептоспир
серотипу Icterohaemorrhagiae (P<0,001)**

Щільність культури патогенних лептоспир, млн. кл / мл						
Статистичні показники	кореневі виділення		листякові змиви		опад	
	дослід	контроль	дослід	контроль	дослід	контроль
1	26,0	29,5	23,0	27,5	8,0	20,0
2	21,5	32,0	27,5	25,5	6,5	18,5
3	18,0	37,0	20,5	35,5	11,5	19,0
4	30,0	33,0	15,5	29,0	13,5	12,0
5	14,5	40,5	33,0	35,5	9,5	22,0
6	19,5	23,0	31,5	30,0	14,0	13,0
7	25,5	39,0	26,0	31,0	12,5	20,0
8	26,0	36,5	22,0	30,5	16,0	18,5
9	15,5	33,5	14,5	29,5	17,0	19,0
10	23,5	42,0	19,0	24,0	14,0	17,0
11	20,5	31,5	21,5	39,0	13,0	20,0
12	19,0	34,5	29,5	37,0	18,0	23,0
13	24,0	39,0	23,0	43,5	16,0	23,0
14	16,5	36,5	21,0	37,5	20,5	20,0
15	22,0	37,0	22,0	40,0	13,0	15,5
M	21,5	35,0	23,3	33,0	13,5	18,7
σ	4,4	4,8	5,4	5,7	2,1	1,9
m	1,2	1,3	1,4	1,5	0,6	0,5
t	7,5		4,7		6,5	

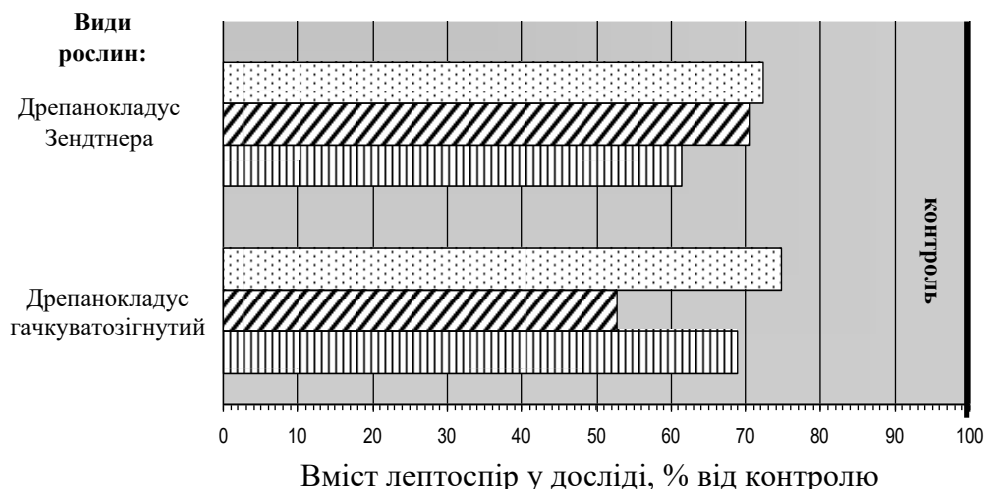


Рис. 1. Вплив на культури лептоспир біологічно-активних речовин, що продукуються представниками відділу Мохи

Перспективи використання результатів дослідження. Враховуючи виявлені закономірності впливу біохімічних виділень зазначених видів мохів на культури патогенних лептоспір *in vitro*, ці рослини

слід розглядати як перспективні щодо використання в майбутньому у комплексі заходів з санації природних та антропогенно змінених водних та перезволожених екосистем від збудників лептоспірозу.

Література

1. Гродзінський А.М. Основи хімічної взаємодії рослин. К.: Наукова думка, 1973. 205с.
2. Гулай О.В. Вивчення біоценотичних зв'язків лептоспір з водними рослинами: Методичні рекомендації. Дніпропетровськ: ВФК "Оксамит-Прес", 2004. 14с.
3. Бойко М.Ф. Чекліст мохоподібних України. Херсон: Айлант, 2008. 229 с.
4. Cyrille Goarant, Gabriel Trueba, Emilie Bierque, Roman Thibeaux, Benjamin Davis, et al. Leptospira and Leptospirosis. A. Pruden; N. Ashbolt; J. Miller. Water and Sanitation for the 21st Century: Health and Microbiological Aspects of Excreta and Wastewater Management (Global Water Pathogen Project), Michigan State University; UNESCO, 2019, Part 3: Specific Excreted Pathogens: Environmental and Epidemiology Aspects – Section 2: Bacteria, ff10.14321/waterpathogens.26ff. f1hal-03252857
5. Thibeaux R, Girault D, Bierque E, Soupé-Gilbert M-E, Rettinger A, Douyère A, Meyer M, Iraola G, Picardeau M and Goarant C (2018) Biodiversity of Environmental *Leptospira*: Improving Identification and Revisiting the Diagnosis. *Front. Microbiol.* 9:816. doi: 10.3389/fmicb.2018.00816
6. Philip N., Bahtiar Affendy N., Ramli S.N.A., Arif M., Raja P., Nagandran E., Renganathan P., Taib N.M., Masri S.N., Yuhana M.Y., Than L.T.L., Seganathirajah M., Goarant, C., Goris M.G.A., Sekawi Z., Neela V.K. (2020) *Leptospira interrogans* and *Leptospira kirschneri* are the dominant *Leptospira* species causing human leptospirosis in Central Malaysia. *PLoS Negl Trop Dis.* 14(3):e0008197. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0008197>
7. Yanagihara, Y. et al. *Leptospira* is an environmental bacterium that grows in waterlogged soil. *Microbiol. Spectr.* 10, e02157–21 (2022). <https://doi.org/10.1128/spectrum.02157-21>

Дата першого надходження статті до видання: 03.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

SPHECIDAE TA CRABRONIDAE (APOIDEA, HYMENOPTERA, INSECTA) СУБАЛЬПІЙСЬКОГО ПОЯСУ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

Сімчук А.П., Сіренко А.Г.

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Галицька, 201, 76000, м. Івано-Франківськ
andrii.simchuk@cnu.edu.ua, artur.sirenko@cnu.edu.ua

Розглянуто та проаналізовано результати багаторічних досліджень (2002 – 2025 років) фауни та екології Sphecidae та Crabronidae (Apoidea, Hymenoptera, Insecta) субальпійського поясу Українських Карпат. Дослідження проводились на 19 полонинах гірських масивів Горгани, Чивчини, Гриняви, Чорногора, а саме, досліджувались полонини: Верхня, Блажів, Бабин Погар, Боровка, Боярин, Середня, Довга, Плоска, Ріж, Братківська (Горгани), Альбіна, Погребіна, Пнів'є, Веснярка (Чивчини та Гриняви), Кострич, Пожижевська, Шпиці, Ребра, Веснярка (Чорногора), що розташовані на висоті від 1300 та 2000 м над рівнем моря. Метою роботи було дослідити Sphecidae та Crabronidae субальпійського поясу Українських Карпат. Цій меті були підпорядковані завдання: дослідити видовий склад Sphecidae та Crabronidae субальпійського поясу Українських Карпат, дослідити трофічну спеціалізацію імаго Sphecidae та Crabronidae – які рослини відвідують виявлені види при живленні нектаром, здійснити ареологічний аналіз виявлених видів Sphecidae та Crabronidae. Актуальність роботи полягає в тому, що в умовах глобальної зміни клімату та посиленого антропогенного тиску фауна і флора субальпійського поясу змінюється, екосистему субальпійського поясу загрожено. Субальпійські луки – полонини заростають лісами, зникають рідкісні види рослин і тварин, ендемічні та монтанні види витісняються видами з нижчих гірських поясів. Важливо дослідити стан екосистем субальпійського поясу, в тому числі стан видових комплексів Sphecidae та Crabronidae, що відіграють важливу роль в екосистемах в якості ентомофагів та арахнофагів. Sphecidae та Crabronidae вважаються групами чутливими до поллютантів та антропогенного тиску, вважаються групами, які можна використовувати в якості біоіндикаторів забруднення і стану екосистем взагалі. Загалом було виявлено 22 види Sphecidae та Crabronidae (14 видів Sphecidae та 8 видів Crabronidae). Досліджено види квіткових рослин, які відвідують виявлені види Sphecidae та Crabronidae в умовах субальпійського поясу Українських Карпат для додаткового живлення пилом і нектаром, досліджено просторовий розподіл, здійснено ареологічний аналіз виявлених видів. Всі виявлені види Sphecidae та Crabronidae були виявлені на квітах рослин родини Аріасеа пилом і нектаром яких імаго цих комах живляться в умовах субальпійського поясу Українських Карпат віддаючи перевагу відвідуванню квітів *Angelica sylvestris* L. та *Daucus carota* L. Виявлено 5 інвазивних видів Sphecidae та Crabronidae, що поширились в тому числі до субальпійського поясу Українських Карпат. Більшість виявлених видів Sphecidae та Crabronidae (6) субальпійського поясу Українських Карпат мають різні варіанти палеарктичного ареалу. *Ключові слова:* фауна, екологія, Sphecidae, Crabronidae, Apoidea, Hymenoptera, Insecta.

Sphecidae and Crabronidae (Apoidea, Hymenoptera, Insecta) of the subalpine belt of the Ukrainian Carpathians. Simchuk A., Sirenko A.

The results of long-term studies (2002-2025) of the fauna and ecology of Sphecidae and Crabronidae (Apoidea, Hymenoptera, Insecta) of the subalpine belt of the Ukrainian Carpathians were reviewed and analyzed. The studies were conducted on 19 mountain valleys of the mountain ranges of Gorgany, Chyvchyn, Hrynyavy, Chornohora, namely, the following mountain valleys were studied: Verkhnyzhnya, Blazhiv, Babyn Pohar, Borevka, Boyaryn, Serednya, Dovga, Ploska, Rizhy, Bratkivska (Gorgany), Albina, Pohrebyna, Pnev, Vesnyarka (Chyvchyn and Hryniavy), Kostrych, Pozhyzhevsk, Shpytsy, Rebra, Vesnyarka (Chornohora), which are located at an altitude of 1300 and 2000 m above sea level. The aim of the work was to study Sphecidae and Crabronidae of the subalpine belt of the Ukrainian Carpathians. This goal was subordinated to the following tasks: to study the species composition of Sphecidae and Crabronidae of the subalpine belt of the Ukrainian Carpathians, to study the trophic specialization of Sphecidae and Crabronidae adults – which plants are visited by the identified species when feeding on nectar, to carry out an areological analysis of the identified Sphecidae and Crabronidae species. The relevance of the work lies in the fact that under conditions of global climate change and increased anthropogenic pressure, the fauna and flora of the subalpine belt are changing, the ecosystem of the subalpine belt is threatened. Subalpine meadows – mountain meadows are overgrown with forests, rare species of plants and animals are disappearing, endemic and montane species are being displaced by species from the lower mountain belts. It is important to study the state of the ecosystems of the subalpine belt, including the state of the species complexes of Sphecidae and Crabronidae, which play an important role in ecosystems as entomophages and arachnophages. Sphecidae and Crabronidae are considered groups sensitive to pollutants and anthropogenic pressure, and are considered groups that can be used as bioindicators of pollution and the state of ecosystems in general. In total, 22 species of Sphecidae and Crabronidae were identified (14 species of Sphecidae and 8 species of Crabronidae). The species of flowering plants that visit the identified species of Sphecidae and Crabronidae in the conditions of the subalpine zone of the Ukrainian Carpathians for additional nutrition with pollen and nectar were studied, the spatial distribution was investigated, and an areological analysis of the identified species was carried out. All identified species of Sphecidae and Crabronidae were found on flowers



of plants of the Apiaceae family, the pollen and nectar of which the adults of these insects feed on in the conditions of the subalpine zone of the Ukrainian Carpathians, preferring to visit the flowers of *Angelica sylvestris* L. and *Daucus carota* L. 5 invasive species of Sphecidae and Crabronidae were identified, which spread to the subalpine zone of the Ukrainian Carpathians. Most of the identified species of Sphecidae and Crabronidae (6) of the subalpine zone of the Ukrainian Carpathians have different variants of the Palearctic range. **Key words:** fauna, ecology, Sphecidae, Crabronidae, Apoidea, Hymenoptera, Insecta.

Постановка проблеми. У сучасному світі монтанні екосистеми, особливо екосистеми субальпійського та альпійського поясів є найбільш загроженими і найбільше змінюються під впливом антропогенного тиску, іноді не безпосереднього, як це відбувається на заповідних територіях, а в результаті змін клімату, поширення інвазійних видів, зміни флористичних комплексів в результаті зникнення випасу свійськими та дикими тваринами, зміни характеру експлуатації людиною екосистем субальпійського поясу. Тому необхідно досліджувати та аналізувати інсектофауну субальпійського поясу та вияснити які зміни відбуваються в інсектофауні субальпійського поясу Українських Карпат, особливо щодо видів, які є екологічно чутливими до антропогенного тиску.

Родини Sphecidae та Crabronidae донедавна об'єднували в одну родину (Sphecidae *sensu lato*), але на початку 2000-них років в результаті філогенетичних досліджень ці родини були остаточно розділені і це закріпилось в систематиці. Одночасно з колишньої родини Sphecidae *sensu lato* були виділені родини Ampulicidae та Heterogynidae. У 2018 році з родини Crabronidae були виділені в окрему родину Bembicidae. На сьогодні родина Sphecidae включає більше 7700 видів у світовій фауні, більше 150 видів у фауні Європи та більше 50 видів у фауні України. Імаго Sphecidae живляться нектаром квітів, а личинок вигодовують паралізованими комахами та павуками. Ведуть одиночний спосіб життя, тільки деякі види мають рудиментарні форми соціальної поведінки. Гнізда риють в ґрунті чи будують з глини чи навіть смоли. Родина Crabronidae на сьогодні включає більше 9000 видів у світовій фауні, більше 500 видів у фауні Європи та більше 250 видів у фауні України. Crabronidae ведуть аналогічний щодо Sphecidae спосіб життя, але деякі види будують гнізда в деревині (мертвій деревині, стеблах рослин чи використовуючи вже існуючі порожнини, що зроблені іншими комахами) (роди *Trypoxylon*, *Pemphredon*). Загалом дані про фауну та екологію Sphecidae та Crabronidae Європи і світу загалом узагальнені в роботах Pulawski W. (2025) [1]. Фауну та екологію Sphecidae та Crabronidae відкритих екосистем (в тому числі субальпійських лук) досліджував Saini S. (2023) [2].

Актуальність дослідження полягає в тому, що в умовах глобальної зміни клімату та посиленого антропогенного тиску фауна і флора субальпійського поясу змінюється, екосистеми субальпійського поясу деградує, зникають або замінюються іншими, що були донедавна характерні для менших

висот над рівнем моря. Субальпійські луки – полонини заростають лісами, зникають рідкісні види рослин і тварин, ендемічні та монтанні види витісняються видами з нижчих гірських поясів. У цій ситуації важливо дослідити стан екосистем субальпійського поясу, в тому числі стан видових комплексів Sphecidae та Crabronidae, що відіграють важливу роль в екосистемах в якості ентомофагів та арахнофагів. Sphecidae та Crabronidae вважаються групами чутливими до полутантів та антропогенного тиску, вважаються групами, які можна використовувати в якості біоіндикаторів забруднення і стану екосистем взагалі [3, 4, 5, 6].

Метою роботи було дослідити Sphecidae та Crabronidae субальпійського поясу Українських Карпат. Цій меті були підпорядковані **завдання**: 1) дослідити видовий склад Sphecidae та Crabronidae субальпійського поясу Українських Карпат; 2) дослідити трофічну спеціалізацію імаго Sphecidae та Crabronidae – які рослини відвідують виявлені види при живленні нектаром; 3) здійснити ареологічний аналіз виявлених видів Sphecidae та Crabronidae.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше було здійснено комплексне дослідження фауни та екології Sphecidae та Crabronidae субальпійського поясу Українських Карпат з аналізом конкретних видів рослин, на яких імаго Sphecidae та Crabronidae здійснюють живлення нектаром та пилом.

Історія дослідження фауни та екології Sphecidae та Crabronidae Українських Карпат має свою довгу історію: перші повідомлення знаходимо в роботах Nowicki M. (1864), пізніше ентомофауну Sphecidae та Crabronidae вивчав Roubal J., 1930 здійснюючи свої дослідження на Закарпатті. У XX столітті Sphecidae та Crabronidae Українських Карпат вивчала Богданова Д. (1985) [7, 8]. Фауну Sphecidae та Crabronidae Туреччини, в тому числі і гірських екосистем вивчав Kaplan E. (2022) [9]. Екологію Crabronidae досліджував Cormons M. (2023) [10]. Але загалом дані про фауну та екологію Sphecidae та Crabronidae як Українських Карпат загалом, так і субальпійського поясу Українських Карпат зокрема на сьогодні дуже розрізнені фрагментарні і потребують подальших досліджень.

Матеріали і методи

Відлов комах здійснювався в субальпійському поясі Українських Карпат – на субальпійських луках та серед криволісся сосни гірської (*Pinus mugo* Turra, 1764) в 2002–2025 роках щороку у червні – серпні в час цвітіння різноманітних покритонасінних рослин, які відвідують імаго Sphecidae та Crabronidae.

Відлов здійснювався на квітах на висотах 1200 – 2000 м над рівнем моря (далі н. р. м.). Дослідження проводились на наступних полонинах, що розташовані на гірських масивах:

Горгани:

Верхнижня (1500 м н. р. м.), Блажів (1350 м н. р. м.), Бабин Погар (1300 м н.р.м.), Боровка (1400 м н. р. м.), Боярин (145 м н.р.м.), Середня (1480 м н.р.м.), Довга (1370 м н.р.м.), Плоска (1350 м н.р.м.), Ріжі (1270 м н. р. м.), Братківська (Чорна полонина) (1780 м н. р. м.).

Чивчини та Гриняви:

Альбіна (1550 м н.р.м.), Погребина (1600 м н. р.м.), Пнів'є (1580 м н.р.м.), Веснярка (1400 м н. р. м.).

Чорногора:

Кострич (1540 м н.р.м.), Пожижевська (1800 м р.м.), Шпиці (1800 м н.р.м.), Ребра (1950 м н. р. м.), Веснярка (під Костричем) (1370 м н. р. м.)

Визначення видів проводилось стандартно згідно класичних методів. Характеристику флори субальпійських лук Українських Карпат та визначення видів рослин проводили з врахуванням робіт Cherepanyn R. (2018) [11].

Результати і обговорення

У результаті проведених багаторічних досліджень, аналізу колекційного матеріалу, зібраного різними колекторами було виявлено 22 види Sphecidae та Crabronidae (14 видів Sphecidae та 8 видів Crabronidae). Нових видів для фауни України не виявлено. Загалом було виявлено і досліджено 36 екземплярів комах. Всі виявлені види і екземпляри були відловлені на квітах родини окружкові = зонтичні (Apiaceae = Umbelliferae). Всього було виявлено Sphecidae та Crabronidae на квітах 14 видів Apiaceae. Найбільше видів Sphecidae та Crabronidae було виявлено на квітах *Angelica sylvestris* L. та *Daucus carota* L. (по 5 видів). Список виявлених видів із зазначенням місць відлову, кількості виявлених екземплярів, їх статі, видів рослин на яких було відловлено зазначено нижче.

Sphecidae

1. *Ammophila campestris* Latreille, 1809 – 3 екземпляри, ♀♀♂, на квітах *Astrantia major* L., *Heracleum carpaticum* Porcius, 1881, *Angelica sylvestris* L. Полонини Боровка, Боярин, Середня. Вид з палеарктичним азіодиз'юнктивним полізональним ареалом.

2. *Ammophila pubescens* Curtis, 1836 – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Selinum carvifolia* L., 1762. Полонина Верхнижня. Вид з євразійським азіодиз'юнктивним полізональним ареалом. Є знахідки в Північній Америці в районі Великих Озер, куди він був судячи по всьому випадково завезений.

3. *Ammophila sabulosa* (Linnaeus, 1758) – 2 екземпляри, ♀♀, на квітах *Kadenia dubia* (Schkuhr) Lavrova & V. N. Tikhom., 1986. Полонина Блажів. Вид з Вид з євразійським азіодиз'юнктивним полізональним ареалом. Є знахідки в Північній Америці

в районі Великих Озер, куди він був судячи по всьому випадково завезений.

4. *Chalybion californicum* (de Saussure, 1867) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Aegopodium podagraria* L., 1753. Полонина Альбіна. Вид з голарктично-патагонсько-гавайським полізональним ареалом.

5. *Isodontia mexicana* (de Saussure, 1867) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Sanicula europaea* L. Полонина Кострич. Вид з неарктичним полізональним ареалом. Випадково завезений до Європи, де поширився на великих територіях.

6. *Liris niger* (Fabricius, 1775) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Daucus carota* L. Полонина Довга. Вид з західнопалеарктично-африкансько-індійським полізональним ареалом.

7. *Podalonia affinis* (W. Kirby, 1798) – 2 екземпляри, ♀♀, на квітах *Conium maculatum* L., *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., 1814. Полонини Пнів'є, Веснярка. Вид із західнопалеарктичним полізональним ареалом. Окремі знахідки були в Канаді та Кореї.

8. *Podalonia hirsuta* (Scopoli, 1763) – 3 екземпляри, ♀♀♂, на квітах *Bupleurum aureum* Fisch. ex Hoffm., 1814, *Chaerophyllum hirsutum* L., 1753. Полонини Плоска, Пожижевська. Вид з Вид із західнопалеарктичним полізональним ареалом. Окремі знахідки були в США.

9. *Prionyx nudatus* (Kohl, 1885) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Laserpitium latifolium* L., 1753. Полонина Середня. Вид зі східноєвропейсько-марокансько-кавказько-туранським полізональним ареалом.

10. *Prionyx subfuscatus* (Dahlbom, 1845) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Pimpinella saxifraga* L., 1753. Полонина Веснярка (під Костричем). Вид з євразійсько-південноафриканським полізональним ареалом.

11. *Sceliphron caementarium* (Drury, 1773) – 4 екземпляри, ♀♀♂♂, на квітах *Angelica sylvestris* L., *Daucus carota* L., *Selinum carvifolia* L., 1762. Полонини Ріжі, Пожижевська, Братківська. Вид з неарктичним полізональним ареалом, але був випадково завезений в різні країни і нині широко поширюється по всьому світу.

12. *Sceliphron curvatum* (F. Smith, 1870) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Daucus carota* L. Полонина Веснярка. Вид з голарктично-неотропічним полізональним ареалом. Окремі знахідки були на островах Тихого океану, куди вид був випадково завезений людиною.

13. *Sceliphron destillatorium* (Illiger, 1807) – 2 екземпляри, ♀♀, на квітах *Angelica sylvestris* L. Полонина Боровка. Вид із західнопалеарктичним полізональним ареалом. Окремі знахідки були в районі Великих Озер, куди вид був випадково завезений людиною.

14. *Sceliphron madraspatanum* (Fabricius, 1781) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm., 1814. Полонина Бабин Погар. Вид з євра-

зійсько-індомалайсько-гавайським полізональним ареалом.

Crabronidae

15. *Crabro cribrarius* (Linnaeus, 1758) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Daucus carota* L. Полонина Боровка. Вид з європейсько-туранським полізональним ареалом. Окремі знахідки були в Північній Америці, куди вид був випадково завезений людиною.

16. *Crabro scutellatus* (von Scheven, 1781) – 3 екземпляри, ♀♀♂, на квітах *Chaerophyllum hirsutum* L., 1753, *Daucus carota* L. Полонина Плоска. Вид з європейським темперантним ареалом.

17. *Mellinus arvensis* (Linnaeus, 1758) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Heracleum carpaticum* Porcius, 1881. Полонина Пожижевська. Вид з європейським полізональним ареалом.

18. *Ectemnius fossorius* (Linnaeus, 1758) – 1 екземпляр, ♂, на квітах *Bupleurum aureum* Fisch. ex Hoffm., 1814. Полонина Братківська. Вид з євразійським азіодиз'юнктивним полізональним ареалом.

19. *Ectemnius dives* (Lepeletier de Saint Fargeau & Brullé, 1835) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Pimpinella saxifraga* L., 1753. Полонина Боровка. Вид з голарктичним азіодиз'юнктивним полізональним ареалом.

20. *Philanthus triangulum* (Fabricius, 1775) – 3 екземпляри, ♀♀, на квітах *Angelica sylvestris* L., *Daucus carota* L., *Kadenia dubia* (Schkuhr) Lavrova & V. N. Tikhom., 1986. Полонина Ріжі, полонина Погребина. Вид з палеарктично-африканським полізональним ареалом.

21. *Crossocerus annulipes* (Lepeletier de Saint Fargeau & Brullé, 1835) – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Angelica sylvestris* L. Полонина Боровка. Вид з голарктичним азіодиз'юнктивним полізональним ареалом.

22. *Crossocerus ovalis* Lepeletier de Saint Fargeau & Brullé, 1835 – 1 екземпляр, ♀, на квітах *Laserpitium latifolium* L., 1753. Полонина Братківська. Вид з європейським бореально-монтанним ареалом.

Загалом з 22 виявлених видів 5 видів – це види інвазійні для Європи та України, що поширю-

ються по світу інтенсивно розширюючи свій ареал і вже неодноразово були помічені в Українських Карпатах. Ареологічний аналіз виявлених видів показав, що найбільше виявлено видів з різними варіантами палеарктичного ареалу (6). З варіантами євразійського ареалу виявлено 4 види, з варіантами голарктичного – 4, вторинноголарктичного – 2, європейського – 2. При цьому майже всі виявлені види мали полізональний ареал і тільки 1 виявлений вид бореально-монтанний. Загалом майже всі виявлені види нетипові для субальпійського поясу, переважно зустрічалися раніше на нижчих висотах або взагалі в рівнинних біотопах. Знахідки цих видів на субальпійських луках є свідченням впливу глобальної зміни клімату і змін в екосистемах субальпійського поясу.

Висновки

1. У результаті багаторічних досліджень на субальпійських луках Українських карпат виявлено 22 види Sphecidae та Crabronidae (Apoidea, Hymenoptera, Insecta).

2. Всі виявлені види Sphecidae та Crabronidae були виявлені на квітах рослин родини Аріасеae пилюком і нектаром яких імаго цих комах живляться в умовах субальпійського поясу Українських Карпат віддаючи перевагу відвідуванню квітів *Angelica sylvestris* L. та *Daucus carota* L.

3. Виявлено 5 інвазивних видів Sphecidae та Crabronidae, що поширилися в тому числі до субальпійського поясу Українських Карпат.

4. Більшість виявлених видів Sphecidae та Crabronidae (6) субальпійського поясу Українських Карпат мають різні варіанти палеарктичного ареалу.

Перспективи використання результатів досліджень

Результати наведених вище досліджень можуть бути використані з природоохоронною метою для контролю стану екосистем субальпійського поясу, зокрема субальпійських лук та субальпійського криволісся Українських Карпат, для аналізу біорізноманіття, динаміки ентомофауни, аналізу загального стану субальпійських екосистем.

Література

1. Pulawski W. Catalog of Sphecidae: Number of Extant Species of Sphecidae. 2025. Available online: <https://www.calacademy.org/catalog-of-sphécidae-genera-and-species> (дата звернення 10.03.2026)
2. Saini S., Dey D., Meena N. Diversity of Crabronid wasp fauna (Hymenoptera: Crabronidae: Crabronini) in the spice ecosystem. *Journal of the Entomological Research Society*. 2023. № 47. P. 797-800. DOI:10.5958/0974-4576.2023.00146.9
3. Bashir N., Naeem M., Li Q., et al. Bioclimatic and Land Use/Land Cover Factors as Determinants of Crabronidae (Hymenoptera) Community Structure. *Insects*. 2026. № 15. P. 100. doi: 10.3390/insects17010100 (дата звернення 12.04.2026)
4. Buys S. An overview of cocoon morphology of Sphecidae (Hymenoptera: Apoidea). *Journal of Natural History*. 2021. № 55. P. 2935-2949. <https://doi.org/10.1080/00222933.2022.2036843> (дата звернення 15.03.2026)
5. Marta S., Brunetti M., Manenti R., et al. Climate and land-use changes drive biodiversity turnover in arthropod assemblages over 150 years. *Nature Ecology & Evolution*. 2021. № 5. P. 1291–1300. doi: 10.1038/s41559-021-01513-0. (дата звернення 16.04.2026)
6. Gayubo S., González J., Asís J., et al. Conservation of European environments: The Spheciformes wasps as biodiversity indicators (Hymenoptera: Apoidea: Ampulicidae, Sphecidae and Crabronidae). *Journal of Natural History*. 2007. № 39. P. 2705 – 2714. <https://doi.org/10.1080/00222930500114095> (дата звернення 17.05.2026)
7. Krichilsky, E., Sann, M., Ohl, M. Systematics of Sphecidae sensu lato: Past, Present, and Future—Quantifying Diversity, Taxonomy, and Phylogeny. *Insect Systematics and Diversity*. 2025. № 9. P. ixaf037. <https://doi.org/10.1093/isd/ixaf037> (дата звернення 20.05.2026)

8. Marchiori C. Mini review of the Family Crabronidae (Insecta: Hymenoptera) sand wasps: Natural history, behavior and taxonomy. *Qeios*. 2023. № 4. P. 1 – 49. <https://doi.org/10.32388/ZF1RZS> (дата звернення 11.02.2026)
9. Kaplan E., Yildirim E. The Current Knowledge of Turkey Sphecidae and Mutillidae (Hymenoptera: Aculeata) Fauna. *International Journal of Agriculture and Wildlife Science*. 2022. № 8. P. 53 – 64. doi: 10.24180/ijaws.1060133 (дата звернення 19.02.2026)
10. Cormons M., Zeil J. Digger wasps *Microbembex monodonta* SAY (Hymenoptera, Crabronidae) rely exclusively on visual cues when pinpointing their nest entrances. *PLoS One*. 2023. № 18. P. e0282144. doi: 10.1371/journal.pone.0282144 (дата звернення 23.03.2026)
11. Cherepanyn R. Effect of climate change on the habitat of rare arctic-alpen plant species in the high mountain part of the Ukrainian Carpathians. *Studia biologica*. 2018. № 12. P. 1. doi.org/10.30970/sbi.1201.544 (дата звернення 29.03.2026)

Дата першого надходження статті до видання: 06.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

НАУКОВІ ПРИНЦИПИ ПІДБОРУ ДЕКОРАТИВНИХ РОСЛИН В УРБООКОСИСТЕМАХ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРИРОДООХОРОННИХ ФУНКЦІЙ

Ткачук О.П., Мазур О.В.

Вінницький національний аграрний університет

вул. Сонячна, 3, 21008, м. Вінниця

tkachukop@ukr.net

У роботі використано комплекс системно-екологічних, порівняльно-географічних та інтродукційних методів аналізу, а також метод екологічного моделювання та матричного аналізу відповідності біоекологічних ознак флори параметрам техногенного навантаження міського середовища. На основі узагальнення вітчизняного та світового досвіду сформульовано та деталізовано чотири базові наукові принципи підбору рослин в урбоекосистемах: принцип відповідності екологічної толерантності техногенному пресингу, принцип кліматичної адаптивності та ксерорезистентності, принцип структурно-ярусної оптимізації та фітоценотичної сумісності, а також принцип екологічної безпеки та збереження біорізноманіття. Розроблено прикладну екологічну матрицю, яка диференціює декоративні види рослин за їхніми морфолого-фізіологічними ознаками (щільність кутикули, опушення, тип кореневої системи) відповідно до специфіки зон техногенного навантаження (примігистральні смуги, промислові зони, житлова забудова, штучні поверхні). Визначено модельні види-біофільтри, здатні ефективно депонувати вуглець, акумулювати важкі метали та пил РМ2.5. Доведено, що перехід від інтуїтивно-естетичного до системно-екологічного підбору флори є передумовою створення стійких та довговічних урбофітоценозів. Впровадження запропонованих принципів у практику муніципального управління та ландшафтного проектування дозволить оптимізувати зелену інфраструктуру міст України, знизити витрати на її утримання та забезпечити адаптацію міських територій до глобальних кліматичних змін. Доведено необхідність жорсткого екологічного цензу при виборі інтродуцентів з метою мінімізації інвазійних ризиків для аборигенного біорізноманіття. Науково обґрунтовано, що створення штучних урбофітоценозів має відбуватися на засадах багаторушності та аделопатичної сумісності, що знижує витрати на подальший антропогенний догляд та полив. *Ключові слова:* урбоекосистема, зелена інфраструктура, декоративні рослини, природоохоронні функції, екологічна матриця, кліматична адаптація, екосистемні послуги.

Scientific principles of selection of ornamental plants in urban ecosystems to provide natural protection functions. Tkachuk O., Mazur O.

The work used a complex of system-ecological, comparative-geographic and introductory methods of analysis, as well as the method of ecological modeling and matrix analysis of the correspondence of bioecological features of flora to the parameters of technogenic load of the urban environment. Based on the generalization of domestic and world experience, four basic scientific principles of plant selection in urban ecosystems were formulated and detailed: the principle of compliance with ecological tolerance to technogenic pressure, the principle of climatic adaptability and xeroresistance, the principle of structural-tier optimization and phytocenotic compatibility, as well as the principle of ecological safety and biodiversity conservation. An applied ecological matrix was developed that differentiates ornamental plant species by their morphological and physiological characteristics (cuticle density, pubescence, type of root system) in accordance with the specifics of zones of technogenic load (highway strips, industrial zones, residential buildings, artificial surfaces). Model species-biofilters capable of effectively depositing carbon, accumulating heavy metals and PM2.5 dust have been identified. It has been proven that the transition from intuitive-aesthetic to systemic-ecological selection of flora is a prerequisite for the creation of sustainable and long-lasting urbophytocenoses. The implementation of the proposed principles in the practice of municipal management and landscape design will allow optimizing the green infrastructure of Ukrainian cities, reducing the costs of its maintenance and ensuring the adaptation of urban areas to global climate change. The need for strict environmental criteria when selecting introducers has been proven in order to minimize invasive risks for native biodiversity. It has been scientifically substantiated that the creation of artificial urbophytocenoses should be based on multi-tiering and allelopathic compatibility, which reduces the costs of further anthropogenic care and watering. *Key words:* urban ecosystem, green infrastructure, ornamental plants, environmental protection functions, ecological matrix, climate adaptation, ecosystem services.

Постановка проблеми. Інтенсивні процеси урбанізації та глобальні зміни клімату призводять до трансформації природних ландшафтів в антропогенні урбоекосистеми, які характеризуються підвищеним рівнем техногенного забруднення, дефіцитом вільного ґрунтового простору та специфічним

мікрокліматом. В умовах щільної забудови зелені насадження відіграють ключову роль як екологічний каркас, виконуючи важливі природоохоронні, санітарно-гігієнічні та естетичні функції. Вони слугують біологічними фільтрами, регулюють мікроклімат, знижують рівень шуму та депонують вуглекислий



газ, тим самим покращуючи якість життя міського населення [1].

Однак, незважаючи на беззаперечну користь, створення стійких зелених зон у межах урбанізованого простору стикається з низкою серйозних перешкод. Традиційні підходи до озеленення міст часто спираються на використання вузького асортименту інтродукованих декоративних рослин без врахування їхньої біоекологічної адаптивності до екстремальних умов середовища. Як наслідок, багаторічні насадження піддаються хлорозу, пошкоджуються фітопатогенами, передчасно старіють або гинуть, втрачаючи свою здатність до повноцінного виконання природоохоронних функцій [2].

Проблема ускладнюється тим, що сучасні містобудівні норми не завжди синхронізовані з останніми досягненнями у галузі міської екології та фітоценології. Відсутність цілісної наукової концепції добору декоративних рослин з урахуванням їхньої газостійкості, пило-, димо- та солестійкості, а також здатності витримувати дефіцит вологи та ущільнення ґрунтів, призводить до деградації зеленого фонду багатьох міст [3].

Таким чином, виникає гостра науково-практична необхідність перегляду та розробки комплексних наукових принципів добору асортименту декоративних рослин. Це дозволить оптимізувати зелену інфраструктуру урбоєкосистем, підвищити резистентність насаджень до антропогенного навантаження та гарантувати стабільне виконання ними екологічних, захисних та рекреаційних завдань [4].

Актуальність дослідження. Актуальність теми дослідження зумовлена необхідністю пошуку нових екологічно безпечних рішень для сталого розвитку міських територій в умовах прогресуючої антропогенної трансформації біосфери. Сучасні тенденції урбанізації супроводжуються посиленням кліматичних аномалій – тривалими періодами посухи, аномальними хвилями тепла та різкими коливаннями температур. Це вимагає негайного перегляду критеріїв формування зеленої інфраструктури, оскільки більшість традиційно використовуваних видів декоративних рослин стрімко втрачають свою життєздатність та декоративність [5].

Особливої ваги це питання набуває у контексті євроінтеграційних прагнень України та адаптації вітчизняного законодавства до вимог Європейського зеленого курсу (European Green Deal) та Стратегії біорізноманіття ЄС до 2030 року. Ці документи декларують обов'язкове збільшення площі та покращення якості зелених насаджень у містах. Проте реалізація цих завдань неможлива без глибокого наукового обґрунтування. Потрібно чітко розуміти, які саме види та фітоценози здатні не просто вижити в агресивному міському середовищі, а й ефективно виконувати екосистемні послуги: очищувати повітря, затримувати пил та важкі метали, поглинати надлишкову вологу під час злив та знижувати температуру повітря [6].

Крім того, актуальність дослідження підсилюється необхідністю мінімізації економічних витрат на утримання міських ландшафтів. Використання випадкового або інвазійного асортименту рослин призводить до постійних фінансових втрат через потребу у частому оновленні насаджень, хімічному захисті від шкідників та інтенсивному поливі. Розробка та впровадження наукових принципів підбору рослин дозволить створювати довговічні, саморегульовані та стійкі до стресових факторів урбофітоценози. Це забезпечить максимальний природоохоронний ефект при раціональному використанні матеріальних ресурсів громад [7].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження є безпосереднім внеском у вирішення фундаментальних та прикладних завдань у галузі міської екології, фітооптимізації техногенного середовища та збалансованого природокористування. Наукова цінність статті полягає у розвитку теоретико-методологічних засад формування стійких екосистем у специфічних умовах урбанізованого середовища. Авторський підхід дозволяє розширити уявлення про механізми адаптації та межі толерантності декоративних рослин до комплексного антропогенного навантаження. Це створює наукове підґрунтя для прогнозування поведінки штучних фітоценозів у мінливих кліматичних умовах.

Результати дослідження, сформульовані принципи та запропонований асортимент рослин можуть бути безпосередньо використані комунальними підприємствами по утриманню зелених насаджень, проєктними інститутами та ландшафтними архітекторами під час реконструкції існуючих та закладання нових об'єктів зеленого будівництва. Це дозволить підвищити екологічну ефективність міського озеленення та забезпечити гарантоване виконання насаджень їхніх природоохоронних функцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та практичні аспекти функціонування урбоєкосистем, а також роль зелених насаджень в оптимізації міського середовища є предметом уваги багатьох екологів, ботаніків та ландшафтних архітекторів. Фундаментальні засади вітчизняної урбоєкології, фітомеліорації та концептуальні підходи до озеленення міст закладені у працях таких відомих вчених, як Бондар А.О., Матусяк М.В., Циганська О.І. [8-10].

У їх наукових доробках значну увагу приділено вивченню середовищевірних, фітонцидних та санітарно-гігієнічних функцій штучних фітоценозів, а також оцінці їхнього стану в умовах антропогенного тиску [11, 12].

У світовій науковій практиці акценти зміщуються у бік кількісної оцінки екосистемних послуг, які надають урбофітоценози. Сучасні закордонні публікації доводять, що стійкість міського озеленення зале-

жить від комплексного аналізу кліматичних та ґрунтових параметрів за тривалий період. Дослідження підтверджують високу здатність видів на кшталт *Platanus × acerifolia* депонувати дрібнодисперсний пил PM_{2.5}, а використання мікоризних грибів розглядається як інноваційний інструмент підвищення посухостійкості рослин на деградованих міських ґрунтах. Окремим трендом є дослідження ролі декоративних рослин у підтримці міського біорізноманіття та залученні запилювачів [13, 14].

Водночас, попри значну кількість публікацій, більшість існуючих робіт мають локальний характер або фокусуються на окремих фізіологічних властивостях конкретних видів. Питання інтеграції біоекологічних параметрів декоративних рослин (газо-, пило-, солейостійкості) у єдину систему наукових принципів добору для забезпечення максимальної природоохоронної ефективності в умовах сучасних міст України залишається недостатньо вивченим і потребує комплексного узагальнення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість фундаментальних досліджень у галузі урбоекології та ландшафтного проектування, низка ключових питань щодо формування стійкої зеленої інфраструктури залишається невирішеною та дискусійною.

По-перше, більшість існуючих рекомендацій із підбору декоративних рослин базуються на застарілих кліматичних нормах і не враховують сучасну динаміку глобального потепління. Зокрема, критично бракує даних щодо адаптаційного потенціалу традиційного асортименту до нових умов – затяжних літніх посух, що чергуються з екстремальними зливами, та тривалого теплового стресу в умовах закритих міських ґрунтів.

По-друге, у вітчизняній практиці досі переважає інтуїтивно-естетичний або суто утилітарний підхід до вибору рослин, тоді як їхній природоохоронний потенціал (здатність до акумуляції важких металів, депонування дрібнодисперсного пилу PM_{2.5}, зниження ефекту «теплового острова») оцінюється лише фрагментарно. Відсутні чіткі математичні чи якісні матриці сумісності біоекологічних властивостей рослин із конкретними категоріями техногенного навантаження міських локацій (магістралі, промислові зони, житлові двори).

По-третє, практично не розроблено алгоритмів формування багатоярусних, стійких до бур'янів та шкідників фітоценозів, які б вимагали мінімального антропогенного догляду та штучного поливу. Питання балансу між використанням високоестетичних інтродуцентів та збереженням аборигенного біорізноманіття з метою недопущення інвазійних ризиків у містах також залишається відкритим.

Саме необхідність подолання цих розбіжностей між декоративними якостями, біоекологічною стійкістю та природоохоронною ефективністю флори

в умовах сучасних міст і обумовила вибір напрямку нашого дослідження.

Новизна. Наукова новизна одержаних результатів полягає у комплексному еколого-біологічному обґрунтуванні критеріїв формування зеленої інфраструктури міст на основі оцінки природоохоронного потенціалу рослин.

Методологічне або загальнонаукове значення. Розробка наукових принципів підбору декоративних рослин в урбоєкосистемах спирається на розгалужену методологічну базу, сформовану на стику екології, ботаніки, ландшафтно-архітектури та містобудування. Загальнонаукове значення дослідження полягає у переході від суто описового та естетичного підходу до системно-екологічного моделювання міського середовища.

Методологічний аналіз наукових джерел дозволяє виділити три ключові концептуальні підходи, що становлять основу сучасної урбоекології: концепція екосистемних послуг, згідно з нею, зелені насадження розглядаються не як елемент декору, а як природний капітал, що забезпечує регулюючі, екологічні та захисні функції. Методологічне значення цього підходу полягає у можливості кількісної оцінки та прогнозування екологічного ефекту від впровадження конкретних видів флори (об'єми депонованого вуглецю чи затриманих опадів).

Популяційно-екологічний та інтродукційний підходи визначають методологію оцінки адаптаційного потенціалу рослин. Життєздатність інтродукованих видів у містах залежить від їхньої норми реакції на комплексні стресори – від ущільнення ґрунтів до хімічного забруднення. Це дозволяє використовувати метод фітоіндикації для моніторингу стану самого урбосередовища.

Концепція кліматичної резистентності та біобезпеки набула особливої актуальності в останні десятиліття через глобальні зміни клімату. Сучасні методологічні праці наголошують на необхідності врахування інвазійного потенціалу декоративних рослин. Добір асортименту має відбуватися за принципом мінімізації екологічних ризиків для аборигенної флори, що узгоджується зі Стратегією біорізноманіття ЄС.

Таким чином, загальнонаукове значення використаної методології полягає у формуванні інтегративного підходу. Він дозволяє поєднати фізіолого-біохімічні параметри стійкості окремих рослин із макроекологічними завданнями сталого розвитку міст, створюючи теоретичне підґрунтя для проектування довговічних та екологічно ефективних урбо-фітоценозів.

Виклад основного матеріалу. Формування сталих урбоєкосистем із високим рівнем виконання природоохоронних функцій потребує відходу від інтуїтивного підбору рослин та переходу до системного аналізу їхнього біоекологічного потенціалу. На основі проведеного аналізу екологічних умов

міського середовища та фізіологічних особливостей декоративної флори було сформульовано чотири базові наукові принципи підбору рослин (рис. 1).

1. Принцип відповідності екологічної толерантності техногенному пресингу. Кожна зона урбоєкосистеми (від магістралей до закритих дворів) має свій рівень і характер забруднення. Добір асортименту має базуватися на матриці стійкості видів до конкретних екологічних чинників:

– для примігстральних смуг критеріями вибору є висока газо-, димо- та пилостійкість, а також толерантність до хлоридів (солей, якими посипають дороги взимку). Високу ефективність тут демонструють види з потужною кутикулою та опушенням листків (*Platanus × acerifolia*, *Acer platanoides*);

– для промислових та санітарно-захисних зон пріоритет надається видам із високою акумуляційною здатністю щодо важких металів та сірчистого ангідриду, наприклад, *Populus nigra*, *Betula pendula*, які виступають у ролі живих біофільтрів (табл. 1).

2. Принцип кліматичної адаптивності та ксерорезистентності. Враховуючи сучасну тенденцію до аридизації клімату України та посилення ефекту міського «теплого острова», ключовим критерієм стає здатність рослин витримувати тривалий тепловий стрес та дефіцит вологи в умовах асфальтованого покриття. Науково обґрунтованим є зміщення акценту на види та культивари, що володіють глибокою кореневою системою або сукулентними властивостями (для трав'янистих ярусів і «зелених дахів», наприклад, представники роду *Sedum*). Важливим є аналіз критичних температурних меж, за яких у рослин руйнується хлорофіл, що дозволяє виключити з асортименту вразливі інтродуценти.

3. Принцип структурно-ярусної оптимізації та фітоценотичної сумісності. Максимальний природоохоронний ефект (акумуляція пилу PM2.5, зниження шуму, затримання зливових вод) досягається лише за умови створення штучних багоярусних фітоценозів, а не поодиноких посадок. Верхній ярус (дерева) забезпечує затінення, зниження темпера-

тури повітря та депонування вуглецю. Середній ярус (кущі) виступає основним бар'єром для поширення транспортного шуму та пилових хвиль на рівні людського зросту. Нижній ярус (багаторічники, ґрунтопокривні рослини) захищає міські ґрунти від ерозії, ущільнення та перегріву.

Обов'язковою умовою є врахування алелопатичних властивостей рослин – їхньої здатності виділяти хімічні сполуки, які пригнічують або стимулюють сусідні види, що гарантує довговічність екосистеми без потреби у частому оновленні.

4. Принцип екологічної безпеки та збереження біорізноманіття. Сучасний підбір рослин не може ігнорувати загрозу біологічних інвазій. Використання агресивних чужорідних видів (*Acer negundo*, *Robinia pseudoacacia* у лісопаркових зонах) призводить до витіснення аборигенної флори та руйнації локальних трофічних ланцюгів. Науковий підхід вимагає жорсткого екологічного цензу: перевага надається стійким аборигенним видам (*Quercus robur*, *Tilia cordata*) або неінвазійним, добре адаптованим інтродуцентам. Озеленення має виконувати функцію підтримки міського біорізноманіття, забезпечуючи кормову базу для міських комах-запилювачів та птахів.

Головні висновки. Обґрунтовано принципи системно-екологічного підходу до формування міського середовища, яка передбачає зміщення пріоритетів від суто естетичного оцінювання декоративних рослин до вимірювання їхньої екологічної та природоохоронної ефективності. Зелені насадження визначено як ключовий елемент екологічного каркаса урбоєкосистем, що надає життєво важливі екосистемні послуги.

Сформульовано та систематизовано чотири базові наукові принципи добору рослин: принцип відповідності екологічної толерантності техногенному пресингу, принцип кліматичної адаптивності та ксерорезистентності, принцип структурно-ярусної оптимізації та принцип екологічної безпеки. Інтеграція цих принципів у практику ландшафтного



Рис. 1. Структурно-функціональна схема наукових принципів підбору рослин для виконання природоохоронних функцій в урбоєкосистемах

Таблиця 1

Екологічна матриця відповідності асортименту рослин техногенним зонам урбоекосистеми

Урбозона техногенного навантаження	Основний екологічний лімітуючий фактор середовища	Необхідна природоохоронна функція рослин	Рекомендовані морфолого-фізіологічні ознаки флори	Приклади модельних видів (дерева, кущі, багаторічники)
Примагістральні смуги (інтенсивний рух транспорту)	Висока концентрація CO, NO _x , SO ₂ ; засолювання ґрунтів; вібрація	Газопоглинання, екранування шуму, затримання пилових хвиль	Щільна кутикула, опушення або восковий наліт на листках, глибокий корінь	<i>Platanus × acerifolia</i> , <i>Acer platanoides</i> , <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Berberis thunbergii</i> .
Промислові та санітарно-захисні зони	Важкі метали у ґрунті (Pb, Cd, Cu), викиди підприємств, закритість ґрунту	Фіторе mediaція ґрунтів, акумуляція токсикантів, бар'єрна функція	Високий індекс фітотолерантності, здатність до гіперакумуляції металів	<i>Populus nigra</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Salix alba</i> , <i>Spiraea vanhouttei</i> .
Житлові та рекреаційні зони (сквери, двори)	Ефект «теплого острова», антропогенне ущільнення ґрунту, дефіцит вологи	Оптимізація мікроклімату, фітонцидна активність, підтримка біорізноманіття	Висока декоративність, виділення летких ефірних олій, атрактивність для запилювачів	<i>Tilia cordata</i> , <i>Catalpa bignonioides</i> , <i>Philadelphus coronarius</i> , <i>Lavandula angustifolia</i> .
Зони штучних поверхонь («зелені дахи», паркінги)	Екстремальний дефіцит ґрунтового живлення і вологи, сонячна інсоляція, вітер	Затримання зливових вод, термоізоляція будівель	Сукулентність, мичкувата поверхнева коренева система, низькорослість	<i>Sedum album</i> , <i>Sedum acre</i> , <i>Sempervivum tectorum</i> , види роду <i>Thymus</i>

проектування є передумовою створення довговічних міських фітоценозів.

Розроблено екологічну мережу відповідності асортименту рослин, яка диференціює декоративні види за їхніми морфолого-фізіологічними ознаками відповідно до зон техногенного навантаження урбо-екосистеми (примагістральні смуги, промислові зони, житлова забудова, штучні поверхні).

Перспективи використання результатів дослідження. Сформульовані наукові принципи та роз-

роблена екологічна матриця підбору декоративних рослин мають широкі перспективи практичного застосування у різних сферах екологічного менеджменту, містобудування та природоохоронної діяльності. Упровадження результатів дослідження у реальний сектор дозволить перейти від декоративного озеленення до концепції стійкої інженерно-екологічної інфраструктури, що безпосередньо сприятиме адаптації українських міст до глобальних кліматичних змін та покращенню якості життя міського населення.

Література

- Мудрак О., Морозова Т., Мудрак Г., Єрмішев О. Адаптивна відповідь *Ranunculus Acris* L. на антропогенне навантаження у селітебних ландшафтах різних природних зон. *Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування»*. 2026. Вип. 1 (9). С. 24-33. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-5681-2026-1.03>
- Матусяк М.В., Панцирева Г.В., Катеринчак Ю.С. Біоекологічні особливості вирощування рослин роду *Clematis* L. *Сільське господарство та лісівництво*. 2024. № 3 (34). С. 157-170. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2024-3-14>
- Панцирева Г.В. Перспективи створення «зелених конструкцій» у проєктуванні закритого середовища. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 3 (30). С. 139-149. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-3-10>
- М'ялковський Р.О., Панцирева Г.В., Безвіконний П.В. Перспективи використання троянди флорібунда в умовах Поділля. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2023. № 3 (103). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovidi/article/view/28641/15084> DOI: [http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi1\(101\).2023.001](http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi1(101).2023.001)
- Нейко І.С., Паламарчук В.Д., Панцирева Г.В., Матусяк М.В., Панцирев О.В. Особливості росту і розвитку декоративних видів люпину в умовах архітектурно-експозиційної ділянки ВНАУ. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 2. С. 77-85. DOI: <https://doi.org/10.33730/2310-4678.2.2023.282752>
- Панцирева Г.В., Нейко І.С., Матусяк М.В., Циганська О.І. Відмінність декоративних видів роду *Raeonia* L. за біометричні вегетативних органів. *Аграрні інновації*. 2023. № 19. С. 88-93. DOI: <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.14>
- Циганська О.І., Піддубна А.М., Долінська О.М. Особливості використання у вертикальному озелененні видів садового плюща (*hedera helix*) в умовах урбанізованого середовища. *Сільське господарство та лісівництво*. 2025. № 4 (39). С. 42-55. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2025-4-4>
- 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>
- Циганська О.І., Долінська О.М., Твердохліб А.В. Перспективи використання культиваторів роду *Spiraea* L. у садово-парковому господарстві та озелененні. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2025. Т. 35. № 1. С. 46-51. DOI: <https://doi.org/10.36930/40350106>

10. Циганська О.І. Особливості створення та експлуатації садів у стилі «Нова хвиля» на садово-паркових об'єктах Вінниччини. *Сільське господарство та лісівництво*. 2022. № 2 (25). С. 198-206. DOI: <https://doi.org/10.37128/2707-5826-2022-2-15>
11. Матусяк М.В., Бондар А.О., Панкова С.О. Оцінка техногенного впливу на стан насаджень лісопаркової зони м. Вінниця. *Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки*. 2026. Вип. 143. Ч. 2. С. 319-325. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.143.2.36>
12. Матусяк М.В. Особливості розмноження та перспективи використання пажитниці багаторічної в культурфітоценозах м. Вінниці. *Аграрні інновації*. 2024. № 27. С. 154-159. DOI: <https://doi.org/10.32848/agra.innov.2024.27.23>
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: PMBSNU, 2025. P. 71. URL: <https://www.researchgate.net/publication/392588629> (дата звернення 23.06.2026).
14. 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 23.06.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 29.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

РОСЛИНИ ЯК ЧИННИК НАДІЙНОСТІ НАЗЕМНИХ ЕКОСИСТЕМ ТА ЇХНЄ ЗНАЧЕННЯ ДЛЯ БІОІНДИКАЦІЇ ТА БІОТЕСТУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ДОВКІЛЛЯ

Хижняк С.В., Корнієнко В.І., Войціцький В.М., Коверсун І.В., Дудченко Н.Я.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ

khs2014@ukr.net

Рослинам належить провідна роль у забезпеченні життєдіяльності та функціональної активності наземних екосистем. Виконуючи роль первинних продуцентів, рослини перетворюють сонячну енергію на хімічну, створюючи основу для живлення всіх інших організмів в екосистемі. Акцентується увага на тому, що завдяки здатності рослин протистояти дії негативних чинників довкілля, формується надійність екосистем до впливу цих чинників, зокрема, хімічних токсичних забруднювачів як природного, так і антропогенного походження. На сьогодні, одним із основних джерел забруднення наземних екосистем – є зони військових дій. Внаслідок застосування різного виду зброї, чисельних вибухів артилерійських снарядів та ракет, пожеж тощо у довкілля потрапляють різноманітні токсичні хімічні сполуки. Зазначається, якщо рослини здатні реагувати на дію забруднювачів довкілля зміною морфологічних, фізіологічних, біохімічних та інших характеристик, вони можуть бути біоіндикаторами стану довкілля в моніторингових дослідженнях. Добір рослин-індикаторів визначається їхнім чутливим реагуванням на вплив забруднювачів. Для оцінки забруднення наземних екосистем показана доцільність використання методу біотестування (фітотестування) за показниками проростання та росту вищих рослин. Еколого-токсикологічне дослідження стану наземних екосистем методами біоіндикації та біотестування дозволяє безпосередньо оцінити біологічно значущу дію забруднювачів. Біологічні методи моніторингу стану наземних екосистем є незамінними, оскільки визначення токсичності і шкідливості забруднювачів для живих організмів дозволить зробити більш надійні прогнози екологічних наслідків забруднення екосистеми, в тому числі внаслідок військових дій. *Ключові слова:* рослини, надійність екосистем, військові дії, забруднювачі довкілля, біоіндикація, біотестування.

Plants as a factor in the reliability of terrestrial ecosystems and their importance for bioindication and biotesting of environmental pollution. Khyzhniak S., Kornienko V., Voitsitskyi V., Koversun I., Dudchenko N.

Plants play a leading role in ensuring the vital activity and functional activity of terrestrial ecosystems. Performing the role of primary producers, plants convert solar energy into chemical energy, creating the basis for nutrition of all other organisms in the ecosystem. The emphasis is on the fact that due to the ability of plants to resist the action of negative environmental factors, the reliability of ecosystems to the influence of these factors, in particular, chemical toxic pollutants of both natural and anthropogenic origin, is formed. Today, one of the main sources of pollution of terrestrial ecosystems is military zones. As a result of the use of various types of weapons, numerous explosions of artillery shells and missiles, fires, etc., various toxic chemical compounds enter the environment. It is noted that if plants are able to respond to the effects of environmental pollutants by changing their morphological, physiological, biochemical and other characteristics, they can be bioindicators of the state of the environment in monitoring studies. The selection of indicator plants is determined by their sensitive response to the effects of pollutants. To assess the pollution of terrestrial ecosystems, the feasibility of using the biotesting (phytotesting) method in determining germination and growth indicators of higher plants is shown. Ecological and toxicological studies of the state of terrestrial ecosystems using bioindication and biotesting methods allow us to directly assess the biologically significant effect of pollutants. Biological methods for monitoring the state of terrestrial ecosystems are indispensable, since determining the toxicity and harmfulness of pollutants for living organisms will allow us to make more reliable predictions of the environmental consequences of ecosystem pollution, including as a result of military operations. *Key words:* plants, ecosystem reliability, military operations, environmental pollutants, bioindication, biotesting.

Постановка проблеми. Рослинам належить провідна роль у колообігу речовин і обміні енергії, що забезпечує існування життя на Землі. В органічних речовинах зелених рослин накопичується сонячна енергія в процесі фотосинтезу. Ці рослини підтримують (разом з фотосинтезуючими мікроорганізмами) необхідний для аеробних організмів рівень Оксигену (O_2) в атмосфері і запобігають утворенню надлишку вуглекислого газу (CO_2).

Рослини є харчовим продуктом для людей та кормом для тварин, а також сировиною для виготовлення товарів. Наземні рослини беруть участь у створенні родючого шару ґрунту, ландшафтоутворенні, формуванні умов для існування інших організмів, важлива їхня роль в регуляції водного балансу та очищенні повітря.

Враховуючи, що рослини – невід’ємний компонент екосистем, в яких вони проростають, над-



звичайно важливу роль надають екології рослин. Це науковий напрямок про взаємозв'язок та взаємовплив рослин та їхніх угруповань з довкіллям [1]. В його основі – визначення умов біологічної рівноваги в природі, в тому числі для рослинності, за яких природа могла би розвиватися у відповідності із запитамі людства і можливостями нашої планети Земля на даний історичний період. Екологічні проблеми давно вже є антропоцентричними, оскільки негативні зміни в природі оцінюють щодо умов існування людей, навіть якщо це стосується проблеми збереження біорізноманіття. Антропогенна діяльність загрожує забрудненню довкілля, порушенню рівноваги популяцій в біосфері, знищенню природних середовищ, руйнуванню екосистем.

На даний час при контролі стану довкілля та оцінці його якості використовують не лише фізико-хімічні методи [2], але і прийоми біоіндикації [3] та біотестування [4] для отримання інформації за реакцією організмів на забруднення екосистем. Саме рослини є поширеними біоіндикаторами стану екосистем [5, 6].

Актуальність дослідження. Рослини – невід'ємний компонент екосистем, в яких вони проростають. Зміна стану довкілля, що викликає порушення структури і функціонування екосистем, обумовлений впливом на їхню біоту, зокрема на такий компонент як рослини. Виходячи з цього, важливим є використання рослин для оцінки стану екосистем враховуючи їхню реакцію на дію негативних чинників довкілля. Розуміння ролі рослин дає можливість їхнього широкого використання для визначення біологічно значущих забруднень наземних екосистем за впливу різноманітних забрудників (токсичних речовин).

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Встановлення процесів, які сприяють адаптації життєздатності рослин до впливу зовнішніх чинників є глобальною екологічною проблемою. Особливо актуально це для культурних рослин, що може сприяти їхньої врожайності, та, взагалі, збереженню біорізноманіття. Багатокомпонентність забруднення наземних екосистем ускладнює ефективність його контролю. Метод біотестування надає інформацію щодо впливу забруднення навколишнього середовища на біоту, оскільки воно базується на реакціях живих організмів на чинники, які можуть діяти синергічно або антагоністично [7]. Використання біотестування із застосуванням сільськогосподарських рослин (пшениця *Triticum aestivum*) сприяло оцінці небезпечності сумісного пестицидного та кадмієвого навантажень на ґрунт аграрної екосистеми [8].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Тотальний техногенний розвиток суспільства спричинив глобальний вплив людства на біосферу. Екологічною проблемою стало порушення струк-

тури і функціонування екосистем внаслідок їхнього забруднення токсичними речовинами. Забруднення, внаслідок привнесення в довкілля різноманітних нехарактерних хімічних чинників або перевищення їх природного рівня у довкіллі, виводить екосистеми з рівноваги [9]. Тому, проблема надійності екосистем за дії забрудників довкілля, що є визначальним в існуванні екосистем і ролі рослин в цьому, продовжує широко досліджуватись [10–13]. Також відмічається можливість використання рослин-індикаторів для оцінки впливу токсичних чинників на екосистеми [5, 6].

Доцільність використання біологічних (біоіндикація і біотестування) методів оцінки якості компонентів довкілля в умовах антропогенного навантаження відмічається поряд з аналітичними методами [5]. Біологічні методи контролю за станом наземних екосистем є незамінними, оскільки визначення токсичності і шкідливості забруднювачів для живих організмів дає можливість оцінити біологічну якість середовища [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для вирішення проблеми збереження життєздатності і функціональної активності наземних екосистем за впливу на них негативних чинників довкілля суттєвим є визначення стійкості біоти цих екосистем, зокрема рослинності. У зв'язку з цим, продовження досліджень з використанням рослин в якості біоіндикаторів рівнів забруднення може сприяти розширенню переліку необхідних для цього рослин. Крім того, біотестування за використання рослин дасть можливість оцінити ризики при багатоконпонентному забрудненні екосистеми. Таким чином, використання рослин дає можливість добирати міри збереження екосистем.

Новизна. Із залученням даних наукової літератури проаналізовані відомості стосовно значення рослинності в наземних екосистемах для підтримання їхнього функціонального стану. Особливо це важливо за впливу негативних чинників довкілля (враховуючи наслідки військових дій), що обґрунтовує необхідність використання рослин для біоіндикації та біотестування цих впливів.

Викладання основного матеріалу. Надійність екосистем – це її фундаментальна властивість (визначається біотою), що означає ефективне існування та функціонування (в межах природних флуктуацій) у випадку мінливих умов середовища та в часі [11, 12]. Тобто здатність підтримувати структуру, самовідновлюватися і саморегулюватися, виконувати притаманні екосистемі функції за зміни умов довкілля. Надійність екосистем взаємопов'язана з їхньою стійкістю – здатністю екосистем в цілому та її об'єктів (складових частин) протистояти дії негативних для них чинників, зберігаючи при цьому в динамічній рівновазі свою структуру і функції [11].

Рослини є фундаментом надійності екосистем, виконуючи роль первинних продуцентів. У процесі фотосинтезу рослини кумулюють енергію Сонця у вигляді хімічних зв'язків органічних сполук (вуглеводів) та виділяють у довкілля Оксиген. Рослини, яким властиві живлення, розмноження, ріст і розвиток, належить провідна роль у забезпеченні життєдіяльності та функціональної активності екосистем, зокрема, наземних екосистем. Тобто, рослини є показником складної високонадійної системи (екосистеми), яка може забезпечуватися використанням високонадійних елементів і/або спеціальними системами відновлення та резервування [12].

Дія негативних чинників довкілля викликає у живих організмів стрес – неспецифічну відповідь, яка характеризується комплексом змін, та є першим необхідним етапом пристосування до змінених умов, етапом адаптації [13]. Адаптація, як загальна властивість всіх організмів, притаманна рослинам, а з урахуванням їхнього фундаментального значення для наземних екосистем, це сприяє стійкості екосистем, а значить і їхній надійності [14].

Існує низка як природних, так і антропогенних чинників (зокрема, хімічних речовин), які можуть бути негативними для рослин за перевищення певного порогу дії. Це так звані «екологічні чинники», вплив яких є характерним для кожного організму і залежить, насамперед, від самого чинника, характеру його дії, а також від періоду життя організму [9].

Антропогенні забруднення – це забруднення довкілля, які викликані діяльністю людини. Вони поділяються на промислові (металургійні, хімічні, електротехнічні та інші небезпечні підприємства); сільськогосподарські (використання добрив і отрутохімікатів та інші, які пов'язані з сільським господарством); промислові та побутові відходи; викиди у довкілля продуктів спалювання викопного палива (вугілля, нафти, газу, торфу, сланцю); викиди і скиди транспортного комплексу, а також забруднювачі внаслідок військових дій [15]. Саме військові дії, які поширюються у всьому світі, є причиною використання зброї та вибухових матеріалів, транспортування військових матеріалів, функціонування військових комплексів, що обумовлює негативний вплив на довкілля [16, 17].

Токсичність забруднювачів (негативний вплив на біоту) проявляється коли вони накопичуються у довкіллі в кількості, достатній для ініціації токсичного ефекту. Забруднювачі концентруються у ґрунті, рослинах, а з кормом надходять до організму тварин, тобто потрапляють трофічними ланцюгами до організму людини.

Для характеристики міграційних процесів забруднювачів довкілля прийнято застосовувати коефіцієнти накопичення і переходу [18]. Для рослин коефіцієнт накопичення (K_n) – показник, який свідчить про те, у скільки разів більшою чи меншою може бути кількість забруднювача в компоненті екосис-

теми (рослина) у порівнянні з його вмістом в об'єкті екосистеми (ґрунт).

$$K_n = C_1 / C_2,$$

де C_1 – вміст забруднювача (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин; C_2 – вміст цього забруднювача (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої маси ґрунту, на якому ці рослини проростали.

Коефіцієнт переходу (K_n) – показник, який становить співвідношення між кількістю забруднювача в компоненті екосистеми і його кількістю у довкіллі, зокрема для рослин:

$$K_n = C_1 / C_3,$$

де C_1 – вміст забруднювача (мг або мкг) в 1 кг повітряно-сухої біомаси рослин; C_3 – поверхневий питомий вміст забруднювача на 1 м² поверхні ґрунту на якому ці рослини проростали (мг або мкг на 1 м² ґрунту) чи ваговий – в 1 кг повітряно-сухого ґрунту кореневої зони (мг або мкг на 1 м² ґрунту кореневої зони).

Рослини, в залежності від чутливості до забруднювачів довкілля, поділяють на індикатори і кумулятори. Рослини-кумулятори здатні у своїй фітомасі (переважно у наземних органах) накопичувати з ґрунту забруднювачі до рівней, які значно перевищують їхню концентрацію в ґрунті. На даний час ідентифіковано понад 500 різновидів рослин-кумуляторів. Серед них є рослини-гіперкумулятори, які здатні накопичувати важкі метали майже в 500 разів більше, ніж у ґрунті [9]. Прикладом рослин-кумуляторів є: соняшник однорічний (*Helianthus annuus*) переважно накопичує Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn; ячмінь (*Hordeum vulgare*) – Al; люцерна (*Medicago sativa*) – Cr; пшениця м'яка (*Triticum aestivum*) – Pb; та інші рослини.

Здатність деяких рослин накопичувати забруднювачі довкілля у великій кількості обумовлена, як вважається, наявністю ендегенних систем, яким притаманна антиокиснювальна спроможність [1].

Рослини-індикатори накопичують забруднювачі до рівня, що не перевищує їхню концентрацію в ґрунті. Характерними рисами рослин-індикаторів є: 1) їх постійна присутність у досліджуваній екосистемі, що дає можливість визначати хронічний вплив негативного чинника; 2) спроможність реагувати дії комплексу негативних чинників; 3) здатність визначати джерела і місця скупчення забруднювачів в екосистемах.

Істотною властивістю рослин-індикаторів є їхня чутливість до негативних чинників довкілля, в тому числі забруднювачів. Рослини є невід'ємною компонентою наземних екосистем, середовище існування яких визначають властивості ґрунту, такі як вологоємність, щільність, засоленість, кислотність тощо. Тобто, за певними рослинами можна визначити стан ґрунту, на якому вони ростуть. Крім того, для контролю стану довкілля та оцінки його якості при антропо-

погенних забруднень застосовують біоіндикацію (фітоіндикацію) – визначення біологічно значущих забруднень на основі реакцій на них рослин-індикаторів.

Добір рослин-індикаторів визначається їхнім чутливим реагуванням на вплив негативного чинника. За необхідності такі рослини-індикатори до певних забруднювачів можна створити методами генетичної інженерії. Найбільш поширеними біоіндикаторами забруднення ґрунтів є: мохи (Musci), лишайники (Lichen), ґрунтові водорості. Таким чином, біоіндикація – вагомий інструмент для визначення комбінованого ефекту внаслідок забруднення наземної екосистеми, що можливо на основі спостереження за реакцією сукупності рослин-індикаторів.

При оцінці забруднення наземних екосистем інформаційним є метод біотестування (фітотестування) за показниками проростання та росту вищих рослин [19]. Наявність широкого спектра рослинних біотестів дає змогу використовувати їх для тестування різноманітних чинників чи групи чинників хімічної та фізичної природи. На сьогодні, одним із основних джерел забруднення наземних екосистем вважаються зони військових дій. Показано, що поряд з аналітичними методами, використання біотестування при комплексній оцінці забруднення ґрунтів внаслідок військових дій сприяє більш надійній оцінці екологічних ризиків [20].

Головні висновки. Рослини відіграють провідну роль в колообігу речовин і обміні енергії в наземних екосистемах. Як компоненти екосистем, вони сприяють надійності та стійкості екосистем до дії негатив-

них чинників довкілля, в тому числі антропогенних забруднювачів. Об'єктивна та повна оцінка екологічного стану екосистем можлива при поєднанні фізико-хімічних методів та методів біоіндикації і біотестування. Біологічні методи, при використанні рослин, дозволяють швидко оцінити екологічний стан наземних екосистем. Застосування різномірних біоіндикаторів є перспективним напрямом у системі екомоніторингу.

Методи біоіндикації (фітоіндикації) та біотестування (фітотестування) дозволяють швидко оцінити біологічно значущу дію негативних чинників довкілля, що може бути актуально при дослідженні впливу військових дій на екосистеми. У свою чергу, це може бути запорукою сталості як природних, так і аграрних екосистем, поліпшення їхнього стану за позитивного керованого впливу на стійкість цих екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Акцентування уваги на значенні рослин в надійність та стійкості екосистем розширює можливість їхнього використання для оцінки стану наземних екосистем за дії негативних чинників довкілля. Особливо це важливо при багатокомпонентному забрудненні довкілля внаслідок військових дій, що дозволить зробити більш надійні прогнози екологічних наслідків та більш ефективні стратегії управління забрудненими ділянками.

Дослідження проводились в рамках науково-дослідної роботи (НДР) № державної реєстрації 0125U001918, що фінансується Міністерством освіти і науки України.

Література

1. Глобальне здоров'я, якість і безпека життя: довідник-монографія у 3-х томах/ В.М. Войціцький та ін. Київ: ЦК «Компринт», 2019. 640 с.
2. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Карамушка В.І. Аналітичні методи визначення хімічних токсичних забруднювачів довкілля: підручник. Київ: Вид-во НАУКМА, 2025. 364 с.
3. Комплексна екологічна оцінка стану довкілля за індикаторними показниками деревних рослин рекреаційних зон м. Запоріжжя / К.С. Крупей та ін. *Екологічні науки*. 2022. № 1, Вип. 40. С. 78 – 84. doi:10.32846/2306-9716/2022.eco.1-40.14
4. Крайнюков О.М., Кривицька І.А. Удосконалення способу визначення ступеня забрудненості ґрунтів методом біотестування. *Вісник Запорізького національного університету. Біологічні науки*. 2018. № 1. С. 83 – 89.
5. Моніторинг екосистем: цілі, необхідність, роль біоіндикації / В.М. Войціцький та ін. *Біоресурси і природокористування*. 2019. № 3 – 4. т. 11. С. 39 – 46.
6. Вибір показників для екологічного нормування наземних екосистем / В.М. Войціцький та ін. *Таврійський науковий вісник*. 2024. № 135. С. 218 – 225. doi:10.32782/2226-0099.2024.135.1.29
7. Paustenbach D. (Ed.) Human and Ecological Risk Assessment: Theory and Practice. Wiley: Hoboken, NY, USA. 2015.
8. Оцінка сумісного пестицидного та кадмієвого навантаження на ґрунт з використанням вищих рослин / С.В. Хижняк та ін. *Агробіологія*. 2022. № 1. С. 71–78. doi: 10.33245/2310-9270-2022-171-1-71-78
9. Жирнов В.В., Савченко Д.А. Біоконверсія відходів: підручник (Частина 1). Київ: ДДП Експо-Друк, 2017. 302 с.
10. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Коверсун І.В., Довбиш О.Б. Характеристика екологічних ризиків в екосистемах та оцінка можливості їх прояву. *Агробіологія*. 2023. № 1. С. 61 – 69. doi:10.33245/2310-9270-2023-179-1-61-69
11. Азаров С.І., Сидоренко В.Л., Задунай О.С. Визначення надійності екосистем до чинника антропогенного тиску. *Екологічна безпека та природокористування*. 2017. № 3 – 4. С. 50 – 57.
12. Надійність агроекосистем: підходи щодо її оцінки та підвищення/ В.М. Войціцький та ін. *Таврійський науковий вісник*. 2021. № 118. С. 327 – 333. doi:10.32851/2226-0099.2021.118.41
13. Приседський Ю.Г., Лихолат Ю.В. Адаптація рослин до антропогенних чинників: підручник. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2017. 98 с.
14. Участь адаптивного потенціалу біологічних систем у формуванні їх надійності/ В.М. Войціцький та ін. *Екологічні науки*. 2024. № 1. Вип. 52. С. 119 – 123. doi:10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.2.22

15. Герасимчук Л.О. Військові дії як чинник утворення відходів. *Таврійський науковий вісник*. 2023. № 133. С. 305-312. doi:10.32782/2226-0099.2023.133.41
16. Сакун А.О., Кутковий Д.О. Оцінка впливу наслідків військових дій на ґрунти. *Екологічні науки*. 2025. № 1. Вип. 58. С. 350 – 353. doi:10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.56
17. Dmytrukha N.M., Kozlov K.P., Herasimova O.V. Soil contamination with heavy metals: a hygienic concern. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2024. Vol. 20. № 1. P. 66 –75. doi:10.33573/ujoh2024.01.066
18. Моделирование миграции экотоксикантов у компонентах агроэкосистем / В.М. Войціцький та ін. *Агроекологічний журнал*. 2019. № 1. С. 36 – 41. doi: 10.33730/2077-4893.1.2019.163246
19. Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії факторів різної природи / Д.М. Гродзинський та ін. Київ: Фітосоціоцентр, 2006. 103 с.
20. Основні підходи для комплексної оцінки забруднення ґрунтів внаслідок військових дій/ С.В. Хижняк та ін. *Екологічні науки*. 2025. № 5. Вип. 62. ч.1. С. 189 – 194. doi:10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.28

Дата першого надходження статті до видання: 29.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЕКОЛОГІЯ ТЕРИТОРІЙ СМАРАГДОВОЇ МЕРЕЖІ

УДК 519.6:504.3.054

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.20>

АСПЕКТИ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ТЕРИТОРІЙ СМАРАГДОВОЇ МЕРЕЖІ В МЕЖИРІЧЧІ ПРИП'ЯТІ ТА СТОХОДУ

Федонюк В.В., Панькевич С.Г.

Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, 43018, м. Луцьк

ecolutsk@gmail.com, psg@gmail.com

У дослідженні проведено оцінку сучасного екологічного стану та безпеки трьох природних територій Смарагдової мережі України, розташованих в межах найбільших річок північного сходу Волинської області – Прип'яті та Стоходу: 1) національного природного парку «Прип'ять – Стохід» (UA0000044); 2) природної території «Заплава Турії – Прип'ять» (UA0000170); 3) природної території «Стохід – Нобель» (UA0000168). Цей стан оцінювався в контексті аналізу регіональних проявів зміни клімату в районі дослідження. Дано фізико-географічну характеристику території даних об'єктів Смарагдової мережі Північного Сходу Волинської області; визначено мікрокліматичні особливості регіону, а також особливості формування клімату; за даними метеостанції Любешів проаналізовано динаміку основних метеорологічних показників за 8 років (період 2018–2025 рр.). На основі цих даних було побудовано графічні матеріали і визначені основні тенденції впливу регіональних змін клімату на ландшафтні комплекси та екосистеми території дослідження. Встановлено, що подальший розвиток виявлених процесів регіональних змін клімату може призвести до їх інтенсивного негативного впливу на природно-ландшафтні комплекси водно-болотних угідь, заплавних комплексів річок та озер в регіоні.

Такий вплив вже проявляється, зокрема, шляхом ураження великої площі деревостанів шкідниками та хворобами лісу, які набули значного поширення через зміни клімату (теплі зими, невимерзання личинок шкідників, відсутність природної саніції збудників хвороб в умовах низьких температур). Особливої уваги потребує моніторинг стану водних комплексів та водно-болотних угідь, оскільки підвищення температур та зростання випаровуваності може призвести до скорочення площі особливо цінних в складі Смарагдової мережі водно-болотних угідь та озерних комплексів (заплави річок Прип'яті, Турії та Стоходу, озеро Люб'язь, озеро Нобель). *Ключові слова:* Смарагдова мережа, Волинська область, клімат, кліматичні зміни, природні комплекси, екологічний стан.

Aspects of the current status and environmental safety of the Emerald Network areas in the Pripjat and Stokhod river basin.
Fedoniuk V., Pankevich S.

The study assessed the current ecological status and safety of three natural areas within Ukraine's Emerald Network, situated in the inter-river region between the largest rivers of north-eastern Volyn Oblast – the Pripjat and the Stokhid: 1) the 'Pripjat–Stokhid' National Nature Park (UA0000044); 2) the 'Turiya Floodplain – Pripjat' natural area (UA0000170); 3) the 'Stokhid – Nobel' natural area (UA0000168). This status was assessed in the context of an analysis of regional manifestations of climate change in the study area. A physical-geographical description of the territory of these sites within the Emerald Network of the North-East of Volyn Oblast is provided; the microclimatic characteristics of the region, as well as the features of climate formation, have been identified; based on data from the Lyubeshiv weather station, the dynamics of key meteorological indicators over an 8-year period (2018–2025) were analysed. Using this data, graphical representations were produced and the main trends in the impact of regional climate change on the landscape complexes and ecosystems of the study area were identified. It has been established that the further development of the identified regional climate change processes may lead to their intense negative impact on the natural landscape complexes of wetlands, floodplain complexes and lakes in the region.

This impact is already becoming apparent, in particular through the widespread infestation of large areas of woodland by pests and forest diseases, which have become much more prevalent due to climate change (mild winters, pest larvae surviving the winter, and the absence of natural control of disease-causing agents under low-temperature conditions). Particular attention must be paid to monitoring the condition of water bodies and wetlands, as rising temperatures and increased evaporation may lead to a reduction in the area of wetlands and lake systems of particular value within the Emerald Network (the floodplains of the Pripjat, Turia and Stokhod rivers, Lake Lyubiaz and Lake Nobel). *Key words:* Emerald Network, Volyn region, climate, climate change, natural complexes, ecological status.



© Федонюк В.В., Панькевич С.Г., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. У роботі проведено оцінку сучасного екологічного стану територій Смарагдової мережі у межиріччі Прип'яті та Стоходу в межах Волинської області України в контексті проявів зміни клімату на основі статистично-графічного аналізу динаміки кліматичних показників протягом періоду 2018–2025 рр.

Актуальність дослідження. Сучасна зміна клімату чинить значний вплив на екосистеми природоохоронних територій, погіршуючи їх екологічний стан та параметри екологічної безпеки. Поглиблюються процеси деградації лісових і водно-болотних комплексів, загострюється проблема дефіциту водозабезпечення. Кліматичні зміни супроводжуються не лише підвищенням температурних показників, а й істотними змінами в існуванні популяцій рослин та диких тварин, зокрема – трансформацією їхніх природних ареалів. Вивчення проявів таких змін та їх впливу на екосистеми – це важливе наукове завдання.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та науково-практичними завданнями. Охорона об'єктів Смарагдової мережі (Emerald Network) країнами – підписантами Бернської конвенції про охорону дикої флори та фауни і природних середовищ існування в Європі є одним із важливих завдань у галузі забезпечення цілей сталого розвитку. Україна, що йде шляхом інтеграції з Європейським Союзом, прагне до повного узгодження національного природоохоронного законодавства з європейським. Саме в контексті цього 10.06.2026 р. Уряд України ухвалив Стратегію збереження біологічного різноманіття України на період до 2035 року та Операційний план заходів з її реалізації на 2026–2028 рр. Стратегія збереження біологічного різноманіття визначає 23 пріоритетних цілей, реалізація яких неможлива без урахування можливостей адаптації природних оселищ до зміни клімату. Тому вивчення даного питання – це завдання, яке є на часі та корелює із Стратегією.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження просторових особливостей, біорізноманіття та сучасного екологічного стану природоохоронних територій, що зазнають впливу зміни клімату, активно проводилося в останні роки як в Україні (Мальований М.С., Боярин М.В., Бедункова О.О., Нетробчук І.М., Волошин В.У., Magas N., Tomchenko O., Zahorodnia S., Sheviakina N., Fedoniuk V., Fesyuk V., Fedoniuk M. [1, 2, 9, 13]), так і у світі (Elsen P. R., Monahan W. B., Dougherty E. R., Merenlender A. M., Hannah L., Midgley G., Andelman S., Araújo M., Hughes G., Martinez-Meyer E., Williams P. [8, 10]). Зокрема, для територій Смарагдової мережі Волинського і Житомирського Полісся детальний аналіз динаміки зростання числа пожеж у контексті зміни клімату проведено у роботі Фесюка В., Федонюка М., Мороз І., Федонюк В. [7], а прояви кліматичних змін у найбільших природно-за-

повідних об'єктах Волинської області досліджувалися у працях Fedoniuk V., Zhadko O., Vovk O., Fedoniuk M., Ivantsiv V. [11] (для Черемського природного заповідника), Федонюк В.В., Іванців Я.В., Іванціва В.В., Федонюка М.А., Жадько О.А., Fedoniuk V., Khrystetska M., Fedoniuk M., Merlenko I., Bondarchuk S. [5, 12, 13] (для Шацького національного природного парку та Черемського ПЗ), Fedoniuk V., Ivantsiv Ya., Ivantsiv V., Zhadko O. [14] (для 4 найбільших об'єктів ПЗФ – Черемського ПЗ та 3 НПП). В межах території дослідження аналізувався вплив зміни клімату на екологічний стан найбільшої природоохоронної території межиріччя Прип'яті і Стоходу – НПП «Прип'ять – Стохід» (Тарасюк Н.А., Тарасюк Ф.П., Приступа О.С., Федонюк В.В. [3, 4] та динаміку гідрологічного режиму водних об'єктів (Фесюк В., Білецький Ю., Баран С., Сидорук Т. [6]). Проте ці роботи є поодинокими, і комплексний аналіз для груп природних територій Смарагдової мережі єдиного субрайону не проводився, що підсилює актуальність роботи.

Виділення не виділених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою роботи є аналіз сучасного екологічного стану та безпеки територій Смарагдової мережі у межиріччі Прип'яті та Стоходу в контексті проявів впливу на біорізноманіття зміни клімату, що виокремлює дану проблему із загальної теми вивчення регіональних кліматичних змін в Українському Поліссі та Волинській області.

Новизна роботи визначається тим, що для території трьох об'єктів Смарагдової мережі у межиріччі Прип'яті та Стоходу комплексний аналіз усіх основних кліматичних показників було здійснено вперше.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження проведене на основі статистично-графічного аналізу метеотрансформації станції Любешів, яка розміщена безпосередньо у межах природних територій межиріччя Прип'яті та Стоходу. Використано стандартні методики обробки та аналізу числових рядів кліматичних показників. Застосована методика може розглядатися як базова для проведення аналогічних досліджень на інших природоохоронних територіях Волинської області, Поліського регіону та України в цілому.

Виклад основного матеріалу. Смарагдова мережа – це загальноєвропейська система природоохоронних територій, створена з метою збереження рідкісних та зникаючих видів флори і фауни, а також цінних природних оселищ, що мають особливе значення для збереження біологічного та ландшафтного різноманіття Європи. Мережа формується в межах держав – учасниць Ради Європи відповідно до положень Бернської конвенції про охорону дикої флори, фауни та природних середовищ існування в Європі [2].

Основу Смарагдової мережі становлять території особливого природоохоронного значення (Areas of

Special Conservation Interest), які визначаються для охорони видів рослин і тварин, що перебувають під загрозою зникнення; збереження рідкісних та типових природних оселищ; підтримання екологічної рівноваги регіонів; збереження природних міграційних шляхів тварин, перелітних та мігруючих птахів. Смарагдова мережа є аналогом мережі Natura 2000 у країнах Європейського Союзу та охоплює держави, що не входять до ЄС. В Україні формування Смарагдової мережі – це важлива складова міжнародних зобов'язань у сфері охорони довкілля та спрямоване на збереження цінних природних територій, рідкісних видів і середовищ їх існування відповідно до європейських природоохоронних стандартів [7, 15].

В Україні мережа розвивається з 2009 року, і на кінець 2025 року до неї включено 377 територій загальною площею понад 8 млн гектарів, що становить приблизно 13,4 % території країни. Ці території вибиралися відповідно до критеріїв Бернської конвенції, вони були оцінені біогеографічно, щоб забезпечити репрезентативність ключових оселищ і видів [2, 7, 15]. Смарагдова мережа відіграє важливу роль не лише у збереженні біорізноманіття, а й у формуванні сталих моделей природокористування, що особливо актуально в контексті розробки стратегій адаптації до сучасної зміни клімату.

Смарагдова мережа у Волинській області є частиною національної системи природоохоронних територій та інтегрується у загальноєвропейську мережу об'єктів особливого статусу. Станом на 01.01.2026 до її структури в області входить 14 об'єктів (великі НПП та заповідник, а також природні території – водно-болотні угіддя, ліси, заплави річок та природні луки) [15].

Північно – Східне Полісся Волинської області – це цікавий підрайон Західного Полісся України, що характеризується густою мережею водних об'єктів, озерних комплексів та водно-болотних угідь. Основою його є природні ландшафтні системи межириччя Прип'яті та Стоходу, значні масиви природних ландшафтних комплексів та водно-болотних угідь тут охороняються в межах найбільшого об'єкту ПЗФ в даному районі – НПП «Прип'ять – Стохід», а також – в межах менших за площею, але

значущих за біорізноманіттям та екологічною роллю природних територій: Заплава Турія – Прип'ять та Стохід – Нобель. Таким чином, в контексті розгляду Північно-Східного району Волинської області ми проаналізували особливості кліматичних змін та можливості їх негативного впливу на біоту і екосистеми для трьох об'єктів Смарагдової мережі: 1) НПП «Прип'ять – Стохід»; 2) Природної території «Заплава Турії – Прип'ять»; 3) Природної території «Стохід – Нобель» (див. рис. 1). Виділення даних елементів Смарагдової мережі в окремий підрайон пояснюється високим рівнем схожості їх екосистем та ландшафтних комплексів (це – заплавні комплекси Прип'яті та її приток, Турії та Стоходу, озерні системи, водно-болотні угіддя у межириччі названих річок). Переважання ділянок з близьким до поверхні заляганням ґрунтових вод, боліт, озер та густа мережа поверхневих водотоків – ці природні особливості, характерні для типових ландшафтів природної зони мішаних лісів, зумовлює високу залежність їх екологічного стану систем від кліматичних чинників, зокрема – від режиму атмосферних опадів, температури та випаровування.

Упродовж останніх десятиліть природні комплекси дедалі відчутніше реагують на прояви глобальних кліматичних змін, які взаємопов'язані з більшістю наявних екологічних проблем. Тому систематичний моніторинг кліматичних коливань набуває особливого значення, оскільки дає можливість визначити ступінь змін природного середовища, простежити тенденції його трансформації та порівняти сучасні показники з даними попередніх років.

Авторами було проаналізовано комплекс основних кліматичних показників та динаміку явищ, серед яких: середні річні температури повітря; відносна вологість; суми атмосферних опадів; середні швидкості вітру та показники загальної хмарності упродовж року, за 2018–2025 рр. за архівними даними ст. Любешів. За результатами статистичного аналізу були побудовані діаграми, що наочно відображають виявлені тенденції кліматичних змін (рис. 2). Зупинимося на основних трендах та динаміці параметрів клімату в регіоні.

Як показав аналіз, спостерігається систематичне перевищення середніми річними температу-



Рис. 1. Об'єкти Смарагдової мережі межириччя Прип'яті та Стоходу у Волинській області (подано за [15])

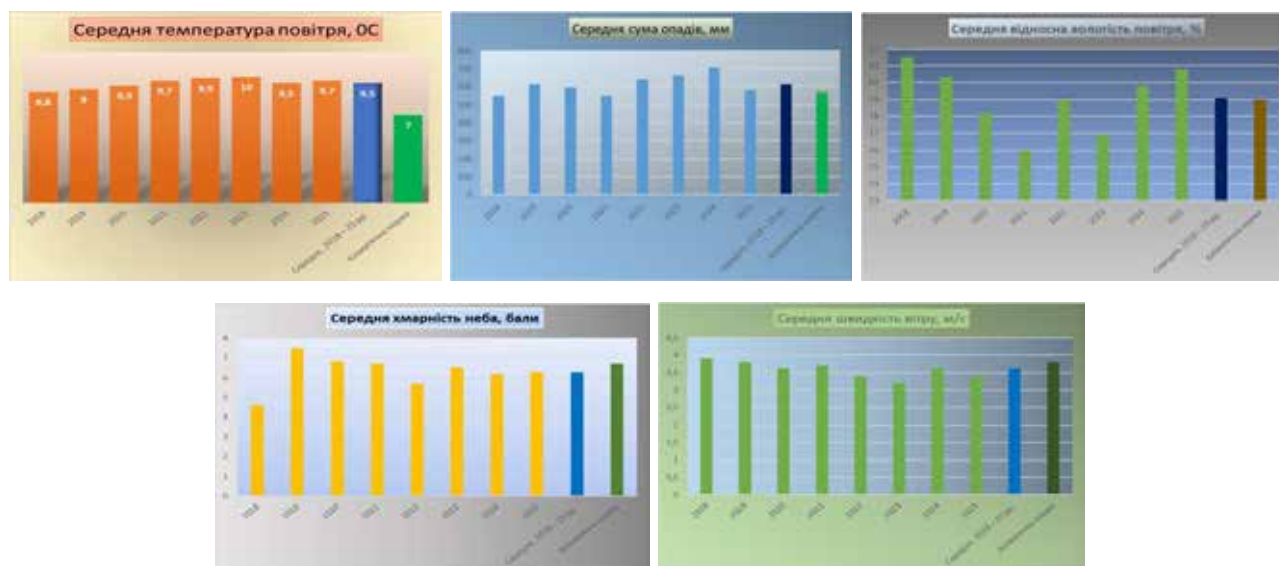


Рис. 2. Зміни основних кліматичних показників на території дослідження протягом 2018–2025 рр.

рами кліматичної норми, у ряді років воно досягало 2°C . Незважаючи на загальну тенденцію до збільшення кількості опадів в регіоні, спостерігається висока міжрічна мінливість даного показника (рис. 2). Такі коливання суттєво впливають на водні ресурси, що може призводити до обміління або пересихання водойм. Показників відносної вологості повітря протягом усього досліджуваного періоду залишалися в межах кліматичної норми (близько 79 %), незважаючи на коливання в окремі роки. Аналіз змін протягом 8-річного періоду загальної хмарності неба показує незначне зниження середніх річних значень, за винятком 2019 року, який був більш хмарним у порівнянні з іншими роками у 2018–2025 рр. Динаміка середніх швидкостей вітру має тенденцію до зниження середньорічних значень, хоча окремі пориви або шквали, можуть бути руйнівними.

Головні висновки. Для територій Смарагдової мережі в межиріччі Прип'яті та Стоходу характерний помірно-континентальний клімат. Основними чинниками, що впливають на його формування в теплий період, є сонячна радіація, в холодний період – циркуляція атмосфери. Особливість цієї місцевості – найнижчі значення середньої річної швидкості вітру у нашому регіоні; опрацювання кліматичних показників за восьмирічний період дозволило встановити ключові регіональні тенденції кліматичних змін у межах природних територій Смарагдової мережі в регіоні дослідження. Зафіксовано під-

вищення середньорічної температури на $2,5^{\circ}\text{C}$, зростання річної кількості атмосферних опадів на 7,5–8,5 %, стабільність показників відносної вологості повітря в межах кліматичної норми (близько 79 %). Водночас спостерігається зменшення хмарності на 0,4–0,5 бали, зниження швидкості вітру на 0,2–0,4 м/с та більш рівномірний розподіл вітрової активності протягом року. Деталізований аналіз літнього сезону (червень – серпень) виявив помітні зміни мікрокліматичних характеристик: підвищення середньомісячної температури в межах $1,2\text{--}2,5^{\circ}\text{C}$, незначне послаблення вітру, збільшення кількості ясних і сухих днів, посилення сезонних температурних коливань та зростання посушливості теплого періоду. У деякі роки зафіксовано зміщення максимуму літніх температур із липня на середину серпня. Реалізація виваженої адаптаційної стратегії до зміни клімату та постійний моніторинг таких змін сприятиме ефективному використанню нових екологічних можливостей.

Перспективи використання результатів дослідження. Дане дослідження може бути продовжене в контексті порівняння тенденцій зміни клімату у всіх об'єктах Смарагдової мережі всієї зони Українського Полісся, з метою виявлення просторово-часових відмінностей. Різне географічне розміщення природоохоронних територій дозволить оцінити відмінності у динаміці таких змін та розробити оптимальні адаптаційні заходи.

Література

1. Мальований М.С., Боярин М.В., Бедункова О.О., Нетробчук І.М., Волошин В.У. Вплив кліматичних змін на водний режим річок Волинської області. *Вісник НУБГП. Сільськогосподарські науки*. Рівне, 2023. 1 (101). С. 150 – 164. DOI : <https://doi.org/10.31713/vs1202311>
2. Сучасний екологічний стан та перспективи екологічно безпечного стійкого розвитку Волинської області: кол. моногр. / В.О. Фесюк, С.О. Пугач, А.М. Слащук; за ред.В.О. Фесюка. К.: ТОВ «П-во «Ві Ен Ей»»: 2016. 316 с.

3. Тарасюк Н.А., Тарасюк Ф.П., Приступа О.С. Регіональні особливості клімату НПП «Прип'ять-Стохід». *Природа Західного Полісся та прилеглих територій* : зб. наук. пр. / за заг. ред. Ф. В. Зузук. Луцьк: СЛУ ім. Лесі Українки, 2017. № 14. Т. 1 : Географія. С. 63 – 69.
4. Федонюк В.В. Прояви кліматичних змін на території національного природного парку «Прип'ять – Стохід». *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2025. № 2 (59). С. 221 – 227. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.есо.2-59.34>
5. Федонюк В.В., Іванців Я.В., Іванців В.В., Федонюк М.А., Жадько О.А. Порівняльний аналіз динаміки кліматичних змін у Черемському ПЗ та у Шацькому НПП. *Наукові записки Тернопільського НПУ імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. Тернопіль: ФОП Осадца Ю.В. № 1 (випуск 61). 2026. С. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.26.1.5>
6. Фесюк В., Білецький Ю., Баран С., Сидорук Т. Зміна гідроecологічного стану річок басейну Прип'яті в межах Волинської області в умовах зміни клімату. *Адаптивний менеджмент ландшафту для нового світового (без-) порядку* : матеріали міжнародної конференції. Львів – Ворохта, 25-28 вересня 2024 року. Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2024. С. 247 – 252.
7. Фесюк В., Федонюк М., Мороз І., Федонюк В. Методика та практична реалізація оцінки масштабів і наслідків пожеж в межах об'єктів Смарагдової мережі Волинського та Житомирського Полісся за даними дистанційного зондування. *Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна «Геологія. Географія. Екологія»*. Харків: 2026, Вип. 63. С. 451 – 467. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-33> URL: <https://periodicals.karazin.ua/geoecco/article/view/28613>
8. Elsen P. R., Monahan W. B., Dougherty E. R., Merenlender A. M. Keeping pace with climate change in global terrestrial protected areas. *Science advances*, 2020. № 6 (25). P. 08 – 14. <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aay0814>
9. Magas N., Tomchenko O., Zahorodnia S., Sheviakina N. Biodiversity threat index: methodology and application for Emerald network sites under catastrophic flood conditions. *Environmental Safety and Natural Resources*, 2026. № 58 (2). P. 83–94. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.83-94>
10. Hannah L., Midgley G., Andelman S., Araújo M., Hughes G., Martinez-Meyer E., ... Williams P. Protected area needs in a changing climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*. 2007. № 5 (3). P. 131 – 138.
11. Fedoniuk V., Zhadko O., Vovk O., Fedoniuk M., Ivantsiv V. Monitoring of Climate Changes and the State of Natural Complexes of the Cheremsky Nature Reserve. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 17th International Scientific Conference. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers. Source: Conference Proceedings, 7-10 Nov. 2023, Volume 2023. P. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520175>
12. Fedoniuk V., Khrystetska M., Fedoniuk M., Merlenko I., Bondarchuk S. Shallowing of the Svityaz Lake in the context of regional climate change. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, Dnipro: 2020. № 29 (4). P. 673 – 683. DOI: <https://doi.org/10.15421/112060>
13. Fedoniuk V., Fesyuk V., Fedoniuk M. Analysis of the dynamics and precipitation regime in the cross-border region Poland-Belarus-Ukraine (2010-2018). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. Dnipro: 2023. № 32 (2). P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/10.15421/112323>
14. Fedoniuk V., Ivantsiv Ya., Ivantsiv V., Zhadko O. Monitoring climate change dynamics in protected areas of Volyn Region. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. 19th International Scientific Conference. Publisher: European Association of Geoscientists & Engineers. Source: Conference Proceedings, 20 – 24 April 2026, Volume 2026. P. 1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202655022>
15. Emerald Network (Смарагдова мережа). Офіційний веб-сайт. URL: <https://emerald.eea.europa.eu/>

Дата першого надходження статті до видання: 06.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ДІЯ ФЕНІЛЗАМІЩЕНИХ ПОХІДНИХ НА ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ АПАРАТ АГРОЦЕНОЗІВ ПШЕНИЦІ

Лоза В.В., Назаренко М.М.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет
вул. С. Єфремова, 25, 49600, м. Дніпро
research.team.ddaeu@gmail.com

У статті наведено результати польового дослідження біорегуляторної дії фенілзаміщених похідних FA-55 (5-феніл-імідазолідин-2,4-діон) та FA-59 (N-(1-гідрокси-2-оксо-2-феніл-етил)-бензенсульфонамід) за передпосівної обробки насіння пшениці м'якої озимої. Досліди проводили в умовах зони Степу на дослідній станції кафедри селекції і насінництва Дніпровського державного аграрно-економічного університету. Об'єктами були сорти МІП Дарунок, МІП Відзнака, Біла, Бісквіт, ДСВ1929121, ФОРСАЙТ і Фокс. Насіння замочували у водних розчинах сполук концентраціями 0,01%, 0,02% і 0,04% протягом 24 годин, водний контроль використовували як базовий варіант. Активність фотосинтетичного апарату оцінювали у фазу колосіння за показником SPAD з подальшим розрахунком сумарного хлорофілу a+b. Встановлено, що FA-55 мав чітко виражений стимулювальний максимум при 0,02%: приріст SPAD становив 14,9–23,3%, а розрахункового хлорофілу – 28,2–45,5% відносно контролю. Найсильніше реагував генотип ДСВ1929121, тоді як у Фокс і ФОРСАЙТ вихідні значення SPAD були вищими, але відносний приріст дещо нижчим. Концентрація 0,04% FA-55 знижувала показники фотосинтетичної активності, що свідчить про перехід від біостимуляції до пригнічення. Для FA-59 позитивний ефект обмежувався переважно концентрацією 0,01%, тоді як 0,02% і 0,04% зумовлювали стабільне зменшення SPAD і вмісту хлорофілу. Отримані дані підтверджують концентраційно залежний і генотип-специфічний характер дії фенілзаміщених похідних та дають підстави розглядати FA-55 0,02% як перспективний режим передпосівної обробки для підтримання фотосинтетичного потенціалу агроценозів пшениці озимої, за якої спостерігалось максимальне зростання показника SPAD та розрахункового вмісту хлорофілу в усіх досліджених сортах. Встановлено, що дві фенілзаміщені похідні по-різному впливали на фотосинтетичний стан рослин пшениці озимої.

Ключові слова: агроценоз, пшениця озима, фотосинтез, SPAD, продуктивність, рістрегулятор.

The effect of phenyl-substituted derivatives on the photosynthetic apparatus of wheat agroecosystems. Loza V., Nazarenko M.

The article presents the results of a field study on the bioregulatory effect of the phenyl-substituted derivatives FA-55 (5-phenyl-imidazolidine-2,4-dione) and FA-59 (N-(1-hydroxy-2-oxo-2-phenyl-ethyl)-benzenesulfonamide) used for pre-sowing treatment of bread winter wheat seed. The experiment was conducted under steppe conditions at the experimental station of the Department of Breeding and Seedfarming, Dnipro State Agrarian and Economic University. The varietal panel included MIP Darunok, MIP Vidznaka, Bila, Biskvit, DSV1929121, FORSAIT and Foks. Seeds were soaked for 24 h in aqueous solutions of each compound at 0.01%, 0.02% and 0.04%, with water-soaked seed as the control. Photosynthetic status was assessed at heading using a SPAD-502 chlorophyll meter, and total chlorophyll a+b was calculated from SPAD readings. FA-55 showed a clear stimulatory optimum at 0.02%, increasing SPAD by 14.9–23.3% and calculated chlorophyll by 28.2–45.5% relative to the control. The strongest response was observed in DSV1929121, whereas Foks and FORSAIT had higher initial SPAD values but a lower relative increase. At 0.04%, FA-55 reduced photosynthetic parameters, indicating a transition from biostimulation to inhibition. For FA-59, the positive effect was mainly limited to 0.01%, while 0.02% and 0.04% consistently reduced SPAD and chlorophyll. The results demonstrate the concentration-dependent and genotype-specific action of phenyl-substituted derivatives and support FA-55 at 0.02% as a promising pre-sowing treatment for maintaining the photosynthetic potential of winter wheat agroecosystems at which the maximum increase in the SPAD value and the calculated chlorophyll content was observed in all studied varieties. It was established that the two phenyl-substituted derivatives affected the photosynthetic status of winter wheat plants differently. **Key words:** agroecosystem, winter wheat, photosynthesis, SPAD, chlorophyll, productivity, bioregulator, phenyl-substituted derivatives.

Постановка проблеми. Стабільність продуктивності пшениці озимої в умовах зони Степу значною мірою залежить від активності фотосинтетичного апарату, особливо у період переходу до генеративного розвитку. Передпосівна обробка насіння сполуками з потенційною рістрегуляторною дією роз-

глядається як один із доступних способів раннього спрямування фізіологічних процесів рослини [1–5].

Актуальність дослідження. Нагальною потребою є пошуку нових препаратів та ідентифікація робочого діапазону їх концентрацій, котрі здатні не лише стимулювати проростання, а й підтримувати



подальше функціонування асиміляційного апарату. Сучасні дослідження доводять, що ефективність так званого праймінгу насіння залежить від природи сполуки, тривалості експозиції, концентрації та генотипу об'єкта дії [2; 3; 6]. Особливо важливим є встановлення межі між стимулювальною та фітотоксичною дією [8; 16].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження пов'язане з науковим завданням підвищення адаптивності агроценозів пшениці озимої за рахунок передпосівної обробки насіння. Для виробництва це означає потенційне підвищення стабільності врожаю, а для агроекологічної практики – додатковий інструмент оцінювання генотип-специфічної реакції на біологічно активні речовини [7; 9–12].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній літературі праймінг насіння розглядають як захід попередньої фізіологічної активації насіння, що може поліпшувати польову схожість, синхронність сходів, водний статус, антиоксидантний захист і продуктивність зернових культур [1–4]. Для пшениці показано позитивний вплив осмопраймінгу PEG і CaCl_2 на ріст, водний режим, SPAD, газообмін та врожайність за посушливих умов [1; 3]. Праймінг у поєднанні з амінокислотними обробками може підвищувати активність та вміст каротиноїдів і загального хлорофілу, а також збільшувати врожайність [4].

Для пшениці та споріднених культур описано здатність окремих сполук модифікувати антиоксидантний статус, підтримувати фотосинтез і зменшувати втрати за стресових умов [5; 8]. Такі сполуки розглядають не тільки як регулятори росту, але і як інструменти керування співвідношенням вегетативного та генеративного розвитку і фотосинтетичною активністю [7; 10; 11]. Разом з тим більшість робіт стосується вже відомих регуляторів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо з'ясованим залишається питання, як саме нові похідні FA-55 і FA-59 впливають на активність фотосинтетичного апарату різних сортів пшениці озимої після передпосівної обробки. Особливо важливо встановити, чи є їхня дія однотипною, чи кожна сполука має власний профіль.

Новизна. Встановленні різноспрямованої дії двох фенілзаміщених похідних на фотосинтетичний статус пшениці озимої. Для FA-55 виявлено виражений оптимум при 0,02%, який супроводжувався максимальним підвищенням SPAD і розрахункового вмісту хлорофілу у всіх досліджених сортів. Для FA-59 встановлено інший тип реакції: помірна стимуляція при 0,01% і пригнічення при 0,02–0,04%.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у поєднанні польового досліді, стандартизованої передпосівної обробки насіння, SPAD-вимірювання

та розрахункової оцінки хлорофілу, що дозволяє порівнювати фізіологічну реакцію рослин.

Виклад основного матеріалу. Польові досліді проводили протягом вегетаційних сезонів 2024–2026 рр. на дослідній станції кафедри селекції і насінництва Дніпровського державного аграрно-економічного університету, передпосівну обробку насіння пшениці м'якої озимої проводили водними розчинами двох сполук FA-55 (5-феніл-імідазолідин-2,4-діон) та FA-59 (N-(1-гідрокси-2-оксо-2-феніл-етил)-бензенсульфонамід), у концентраціях 0,01%, 0,02% і 0,04%. Досліджували сорти пшениці озимої МПП Дарунок, МПП Відзнака, Біла, Бісквіт (Україна), ДСВ1929121 (Німеччина), ФОРСАЙТ і Фокс (Франція). Площа кожної дослідної ділянки становила 10 м², повторність трьохкратна. Агротехнічні заходи та система захисту рослин відповідали регіональним рекомендаціям для степової зони. Ступінь активності фотосинтетичного апарату вимірювали за допомогою хлорофілометра SPAD-502. Загальну концентрацію хлорофілу (a + b) оцінювали за показниками SPAD відповідно до загальноприйнятої залежності $\text{Chl} = 10M^{0.265}$, де M – значення SPAD [7]. Усі статистичні аналізи виконували у програмі Statistica 10.0. Дані обробляли за допомогою факторного аналізу (ANOVA).

Дія FA-55 мала чітко виражений стимулювальний характер у діапазоні 0,01–0,02% (табл. 1). У всіх сортів 0,01% підвищував SPAD порівняно з контролем, однак максимальна реакція припадала на 0,02%. Для МПП Дарунок приріст SPAD при 0,02% становив 18,0%, для Білої – 18,8%, для Бісквіту – 19,4%, а для ДСВ1929121 – 23,3%. Подібна закономірність простежувалася і за вмістом хлорофілу.

FA-55 у концентрації 0,02% істотно посилював потенціал накопичення хлорофілу. Це особливо важливо для фази колосіння, коли листовий апарат забезпечує формування зернівки і визначає можливість наливу зерна. Водночас західні генотипи ДСВ1929121, ФОРСАЙТ і Фокс мали вищі контрольні значення SPAD, але відносний приріст за дії FA-55 0,02% коливався в межах 14,9–23,3%.

Концентрація 0,04% FA-55 змінювала характер дії препарату. У всіх сортів вона знижувала SPAD і розрахунковий вміст хлорофілу відносно контролю. Найбільші втрати SPAD спостерігалися у МПП Відзнака та МПП Дарунок, тоді як у ДСВ1929121, ФОРСАЙТ і Фокс зниження було менш різким. Такий результат підтверджує наявність фітотоксичного порогу.

Профіль дії FA-59 істотно відрізнявся від FA-55 (табл. 2). Для цієї сполуки стимулювальний ефект був обмежений концентрацією 0,01%. У цьому варіанті приріст SPAD становив від 4,5% у ФОРСАЙТ до 10,7% у сорту Біла, а приріст розрахункового хлорофілу – від 8,1% до 19,0%. FA-59 може проявляти позитивну дію лише на нижній межі концентраційного діапазону.

Таблиця 1

Фотосинтетична активність за дії FA-55

Сорт	Soil Plant Analysis Development (SPAD)	Chl, mkmol/cm ²
МІП Дарунок	47,64 ± 1,31 ^a	608,07 ± 11,11
МІП Дарунок, FA-55 0.01%	51,90 ± 1,34 ^b	704,47 ± 11,90
МІП Дарунок, FA-55 0.02%	56,21 ± 1,41 ^c	810,42 ± 11,17
МІП Дарунок, FA-55 0.04%	43,16 ± 1,30 ^d	515,28 ± 11,17
МІП Відзнака	47,56 ± 1,16 ^a	606,34 ± 11,20
МІП Відзнака, FA-55 0.01%	51,12 ± 1,14 ^b	686,21 ± 11,50
МІП Відзнака, FA-55 0.02%	55,34 ± 1,20 ^c	788,34 ± 11,00
МІП Відзнака, FA-55 0.04%	42,88 ± 1,22 ^d	509,76 ± 11,50
Біла	47,14 ± 1,24 ^a	597,29 ± 11,60
Біла, FA-55 0.01%	51,70 ± 1,20 ^b	699,77 ± 11,40
Біла, FA-55 0.02%	56,01 ± 1,23 ^c	805,31 ± 11,16
Біла, FA-55 0.04%	43,56 ± 1,22 ^d	523,22 ± 11,79
Бісквіт	46,99 ± 1,11 ^a	594,07 ± 11,60
Бісквіт, FA-55 0.01%	51,62 ± 1,14 ^b	697,89 ± 11,40
Бісквіт, FA-55 0.02%	56,12 ± 1,16 ^c	808,12 ± 11,16
Бісквіт, FA-55 0.04%	43,47 ± 1,25 ^d	521,42 ± 11,79
ДСВ 1929121	52,11 ± 0,92 ^a	709,44 ± 7,21
ДСВ 1929121, FA-55 0.01%	59,15 ± 0,91 ^b	887,72 ± 9,50
ДСВ 1929121, FA-55 0.02%	64,26 ± 0,80 ^c	1032,12 ± 9,39
ДСВ 1929121, FA-55 0.04%	50,30 ± 0,83 ^d	667,31 ± 9,50
ФОРСАЙТ	53,53 ± 1,01 ^a	743,53 ± 9,24
ФОРСАЙТ, FA-55 0.01%	56,85 ± 0,95 ^b	826,90 ± 10,03
ФОРСАЙТ, FA-55 0.02%	63,16 ± 1,03 ^c	999,93 ± 9,79
ФОРСАЙТ, FA-55 0.04%	51,08 ± 0,97 ^d	685,28 ± 9,79
Фокс	54,11 ± 1,01 ^a	757,72 ± 10,01
Фокс, FA-55 0.01%	57,78 ± 0,95 ^b	851,18 ± 10,00
Фокс, FA-55 0.02%	62,16 ± 1,02 ^c	971,20 ± 9,89
Фокс, FA-55 0.04%	51,57 ± 0,99 ^d	696,71 ± 9,77

Примітка: факторний аналіз ANOVA підтвердив достовірний вплив концентрації досліджуваної речовини на варіювання показників за рівня значущості $P \leq 0,05$.

За підвищення концентрації FA-59 до 0,02% спостерігалось стабільне зниження обох показників у всіх генотипів. Найбільш виражене зменшення SPAD було зафіксовано у Бісквіт, МІП Дарунок і МІП Відзнака. Концентрація 0,04% посилювала депресивний ефект: зниження розрахункового хлорофілу досягало 18,3–23,9% залежно від сорту.

Порівняння двох сполук показує, що FA-55 має більш практично-цінний профіль дії. Концентрація 0,01% діє як помірний стимулятор, 0,02% – як оптимальний режим. FA-59, навпаки, демонструє звужене вікно позитивної дії: 0,01% стимулює, але 0,02% уже викликає пригнічення. Підбір біорегулятора має здійснюватися через встановлення фізіологічно безпечної концентрації.

У цьому досліді FA-55 0,02% був найперспективнішим варіантом для посилення фотосинтетичного статусу рослин. FA-59 0,01% може розглядатися як

м'який стимулятор, але його застосування потребує більш обережного підходу.

Головні висновки. Передпосівна обробка насіння пшениці озимої фенілзаміщеними похідними FA-55 і FA-59 суттєво змінювала показники SPAD та розрахункового вмісту хлорофілу а+в у фазу колосіння. FA-55 мала найбільш виражену стимулювальну дію при концентрації 0,02%. У цьому варіанті приріст SPAD становив 14,9–23,3%, а хлорофілу – 28,2–45,5% залежно від генотипу. Технологічно перспективним режимом у межах досліду є FA-55 0,02%, тоді як FA-59 потребує подальшого дослідження.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним є розширення дослідження на показники врожайності, якості зерна, антиоксидантного статусу і польової стійкості до стресових чинників.

Таблиця 2

Фотосинтетична активність за дії FA-59

Сорт	Soil Plant Analysis Development (SPAD)	Chl, mkmol/cm ²
МІП Дарунок	47,64 ± 1,31 ^a	608,07 ± 11,11
МІП Дарунок, FA-55 0.01%	50,74 ± 1,05 ^b	677,42 ± 11,41
МІП Дарунок, FA-55 0.02%	44,12 ± 1,14 ^c	534,44 ± 11,91
МІП Дарунок, FA-55 0.04%	41,11 ± 1,12 ^d	475,66 ± 11,91
МІП Відзнака	47,56 ± 1,16 ^a	606,34 ± 11,20
МІП Відзнака, FA-55 0.01%	50,91 ± 1,05 ^b	681,34 ± 10,76
МІП Відзнака, FA-55 0.02%	44,15 ± 1,03 ^c	535,05 ± 11,39
МІП Відзнака, FA-55 0.04%	41,85 ± 0,85 ^d	489,76 ± 11,07
Біла	47,14 ± 1,24 ^a	597,29 ± 11,60
Біла, FA-55 0.01%	52,17 ± 1,11 ^b	710,86 ± 11,47
Біла, FA-55 0.02%	44,17 ± 1,00 ^c	535,45 ± 11,90
Біла, FA-55 0.04%	40,93 ± 1,06 ^d	472,26 ± 11,16
Бісквіт	46,99 ± 0,93 ^a	594,07 ± 11,60
Бісквіт, FA-55 0.01%	49,67 ± 1,11 ^b	653,00 ± 11,47
Бісквіт, FA-55 0.02%	43,16 ± 0,86 ^c	515,28 ± 11,90
Бісквіт, FA-55 0.04%	40,13 ± 0,78 ^d	457,33 ± 11,16
ДСВ 1929121	52,11 ± 0,92 ^a	709,44 ± 7,21
ДСВ 1929121, FA-55 0.01%	55,74 ± 0,82 ^b	798,45 ± 9,50
ДСВ 1929121, FA-55 0.02%	49,19 ± 0,87 ^c	642,21 ± 9,50
ДСВ 1929121, FA-55 0.04%	45,40 ± 0,80 ^d	560,60 ± 8,76
ФОРСАЙТ	53,53 ± 1,01 ^a	743,53 ± 9,24
ФОРСАЙТ, FA-55 0.01%	55,94 ± 1,03 ^b	803,53 ± 10,10
ФОРСАЙТ, FA-55 0.02%	50,40 ± 1,01 ^c	669,60 ± 10,10
ФОРСАЙТ, FA-55 0.04%	47,60 ± 0,92 ^d	607,21 ± 10,10
Фокс	54,11 ± 1,01 ^a	757,72 ± 10,01
Фокс, FA-55 0.01%	57,94 ± 1,02 ^b	855,40 ± 9,10
Фокс, FA-55 0.02%	50,40 ± 0,86 ^c	669,60 ± 9,01
Фокс, FA-55 0.04%	46,17 ± 0,67 ^d	576,67 ± 8,18

Примітка: факторний аналіз ANOVA підтвердив достовірний вплив концентрації досліджуваної речовини на варіювання показників за рівня значущості $P \leq 0,05$.

Література

1. Aldahadha A., Alhajaj N., Shakhathreh Y., Bani Khalaf Y., Samarah N., Alzoubi E. Seed priming improved the physiological parameters, growth, and yield of durum wheat varieties under tillering and anthesis drought stress conditions. *Australian Journal of Crop Science*. 2024. Vol. 18, № 3. P. 178–186. <https://doi.org/10.21475/ajcs.24.18.03.PNE4098>.
2. Anwar M.P., Akhter M., Aktar S., Kheya S.A., Islam A.K.M.M., Yeasmin S., Hasan A.K., Rashid M.H.O. Relationship between seed priming mediated seedling vigor and yield performance of spring wheat. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*. 2024. Vol. 93, № 6. P. 1159–1177. <https://doi.org/10.32604/phyton.2024.049073>.
3. Bani Khalaf Y., Aldahadha A., Migdadi O., Alkaabnh A. Seed priming with polyethylene glycol improved drought tolerance of late sown wheat by enhanced gas exchange attributes. *Agronomy Research*. 2025. Vol. 23, № S2. P. 805–821. <https://doi.org/10.15159/AR.25.069>.
4. Fahim N.H., Aboutalebian M., Chaichi M. Seed hydropriming and amino acid sprays mitigate drought stress impacts on rainfed wheat biochemistry and yield under supplementary irrigation. *The Journal of Agricultural Science*. 2026. Vol. 164. e2. <https://doi.org/10.1017/S0021859625100300>.
5. Hmissi M., Nsiri K., Zagoub R., Gimeno-Nieves V., Krouma A., Chaieb M., García-Sánchez F. Salinity stress mitigation in durum wheat via seed hormonal priming. *Plants*. 2026. Vol. 15, № 7. 1103. <https://doi.org/10.3390/plants15071103>.
6. Iglesias-Ganado Á., Martín-García J., Poveda J., López-Sainz M. F., Sánchez-Gómez T., Santamaría O. Improvement of wheat and barley cultivation through seed priming with UV, ozone, and nutripriming (Fe, Zn, and B). *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, № 18. 9988. <https://doi.org/10.3390/app15189988>.

7. Nazarenko M., Khoroshun I. Estimation of effectivity of new growth regulators on winter wheat productivity and quality. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2025. Vol. 16, № 4. e25190. <https://doi.org/10.15421/0225190>.
8. Nazarenko M., Okselenko O., Pozniak V. Ecology- and geography-related features of winter wheat varieties for the areas of insufficient humidification. *Agriculture and Forestry*. 2023. Vol. 69, № 3. P. 159–177. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.69.3.11>
9. Peng D., Xu H., Guo Z., Cao W., Zhang J., Liu M., Wang X., Tang Y., Cai T. Characteristics of lodging resistance of wheat cultivars from different breeding decades as affected by the application of paclobutrazol under shading stress. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, № 8. 1848. <https://doi.org/10.3390/agronomy15081848>.
10. Rossini A., Ruggeri R., Rossini F. Use of foliar biostimulants in durum wheat: Understanding its potential in improving agronomic and quality responses under Mediterranean field conditions. *Plants*. 2025. Vol. 14, № 15. 2276. <https://doi.org/10.3390/plants14152276>.
11. Sharifi L., Ghiyasi M., Talebian B., Danesh Y.R., Najafi S., Tunçtürk M., Tunçtürk R., Farda B., Pace L. Machine learning-based evaluation of seed priming and foliar nutrition effects on rainfed wheat productivity. *PeerJ*. 2026. Vol. 14. e20578. <https://doi.org/10.7717/peerj.20578>
12. Sumbal S., Ali A., Binjawhar D.N., Ullah Z., Eldin S.M., Iqbal R., Sher H., Ali I. Comparative effects of hydropriming and iron priming on germination and seedling morphophysiological attributes of stay-green wheat. *ACS Omega*. 2023. Vol. 8. P. 23078–23088. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c02359>
13. Todorova D., Nikolova T., Sergiev I., Anev S. The effect of seed priming with polyamine spermine on key photosynthetic parameters in *Fusarium culmorum* infected winter wheat. *Agronomy*. 2025. Vol. 15, № 12. 2675. <https://doi.org/10.3390/agronomy15122675>.
14. Wang X., Shi Y. Effects of different seed priming agents on seed germination and physiological characteristics of wheat under saline-alkali stress. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 2024. Vol. 84, № 4. P. 489–499. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392024000400489>.
15. Wojtyła Ł., Wleklik K., Borek S., Garnczarska M. Polyamine seed priming: A way to enhance stress tolerance in plants. *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25. 12588. <https://doi.org/10.3390/ijms252312588>.
16. Xu B., Zheng C., Sun T., Wu Y., He M., Chen W., Zhang P., Jiang H. Beneficial effects of triadimefon in overcoming drought stress in wheat seedlings. *Journal of Plant Physiology*. 2023. Vol. 286. 154002. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2023.154015>
17. Zhang Y., He Z., Xing P., Luo H., Yan Z., Tang X. Effects of paclobutrazol seed priming on seedling quality in wheat. *BMC plant biology*. 2024. Vol. 24, № 1. 53. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04683-0>.

Дата першого надходження статті до видання: 06.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

СПОСІБ ОЦІНКИ МОРОЗОСТІЙКОСТІ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ОРГАНОГЕНЕЗУ РОСЛИН

Юрченко Т.В.¹, Пикало С.В.¹, Гудзенко В.М.^{2,3}, Кузьменко Є.А.¹, Пірич А.В.¹

¹Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла
Національної академії аграрних наук України
08853, с. Центральне, Обухівський р-н, Київська обл.

²Носівська селекційно-дослідна станція
Миронівського інституту пшениці імені В.М. Ремесла
Національної академії аграрних наук України
вул. Миру, 1, 17131, с. Дослідне, Носівський р-н, Чернігівська обл.

³Український інститут експертизи сортів рослин
вул. Генерала Родимцева, 15, 03041, м. Київ
pykserg@ukr.net

Зернові культури посідають провідне місце у структурі сільськогосподарського виробництва, тому підвищення їх урожайності та збільшення обсягів валового збору є одним із ключових завдань аграрного сектору України. Важливою складовою адаптивного потенціалу сортів озимих зернових культур є їхня здатність витримувати дію низьких температур. На сьогодні для оцінювання морозостійкості розроблено значну кількість методичних підходів, що ґрунтуються на різних принципах дослідження, проте багато з них не повною мірою відповідають сучасним вимогам селекційної практики. У зв'язку з цим актуальним залишається пошук нових та вдосконалення існуючих способів визначення стійкості рослин до низькотемпературного стресу. У представленій роботі проведено аналіз і порівняння відомих методів оцінювання морозостійкості, охарактеризовано їхні переваги та обмеження. Запропоновано удосконалений спосіб визначення морозостійкості зернових культур на різних етапах розвитку, в основі якого лежить вплив контрольованого низькотемпературного стресу, що забезпечує диференціацію генотипів за рівнем морозостійкості. Запропонований спосіб охороняється патентом на корисну модель. Новим є те, що оцінювання генотипів проводять у висівних ящиках при дії різних температурних режимів морозильної камери КНТ-1М на рослини, отриманих за сівби насіння у строки 15.09, 25.09, 05.10, 15.10, за схемою: -16 °C, -18 °C, -20 °C (для пшениці м'якої); -14 °C, -16 °C, -18 °C (для пшениці твердої); -12 °C, -14 °C (для ячменю); -18 °C, -20 °C (для тритикале). Розроблений підхід дає змогу підвищити ефективність оцінювання морозостійкості зразків та скоротити тривалість селекційного процесу. Перевагою запропонованого методу є можливість оцінювання селекційного матеріалу на різних етапах органогенезу рослин, що забезпечує більш об'єктивне визначення рівня морозостійкості незалежно від особливостей перебігу осінньо-зимового періоду. На відміну від існуючих підходів, метод знижує ризик отримання недостовірних результатів, пов'язаних із недостатнім загартовуванням рослин та їх повною загибеллю під час проморожування. Його використання в селекційних програмах зернових колосових культур сприятиме створенню нових високопродуктивних сортів із комплексом господарсько цінних ознак.

Ключові слова: озимі зернові культури, метод, стійкість, низькі температури, оцінювання.

Method for assessing frost tolerance of cereal crops at different stages of plant organogenesis. Yurchenko T., Pykalo S., Hudzenko V., Kuzmenko Ye., Pirych A.

Cereal crops occupy a leading position in the structure of agricultural production; therefore, increasing their productivity and gross yield is one of the key objectives of Ukraine's agricultural sector. An important component of the adaptive potential of winter cereal varieties is their ability to withstand low-temperature stress. To date, a considerable number of methodological approaches have been developed for frost tolerance assessment, based on different research principles; however, many of them do not fully meet the current requirements of breeding practice. Therefore, the development of new methods and the improvement of existing approaches for determining plant resistance to low-temperature stress remain highly relevant. The present study analyzes and compares existing methods for frost tolerance assessment and characterizes their advantages and limitations. An improved method for determining frost tolerance in cereal crops at different stages of plant development is proposed. The method is based on the application of controlled low-temperature stress, which enables the differentiation of genotypes according to their level of frost tolerance. The proposed method is protected by a utility model patent. The novelty of the method lies in the evaluation of genotypes grown in seed boxes under different temperature regimes in a KNT-1M freezing chamber. The plants are obtained from seeds sown on September 15, September 25, October 5, and October 15 and are subjected to the following freezing temperatures: -16 °C, -18 °C, and -20 °C for common wheat; -14 °C, -16 °C, and -18 °C for durum wheat; -12 °C and -14 °C for barley; and -18 °C and -20 °C for triticale. The developed approach makes it possible to improve the efficiency of frost tolerance assessment and reduce the duration of the breeding process. A major advantage of the proposed method is the possibility of evaluating breeding material at different stages of plant organogenesis, which ensures a more objective determination of frost tolerance regardless of the specific conditions of the autumn–winter period. Unlike existing approaches, the method reduces the risk of obtaining unreliable results caused by insufficient plant hardening and complete plant mortality during freezing tests. Its implementation in cereal breeding programs will facilitate the development of new high-yielding varieties possessing a combination of economically valuable traits. **Key words:** winter grain crops, method, resistance, low temperatures, evaluation.



Постановка проблеми. Сучасні тенденції глобальної зміни клімату істотно впливають на функціонування агроєкосистем та рівень продуктивності сільськогосподарських культур. Зростання частоти погодних аномалій, коливання температурного режиму та збільшення кількості екстремальних метеорологічних явищ призводять до нестабільності врожайності зернових культур і суттєво ускладнюють реалізацію їх генетичного потенціалу [1]. За таких умов особливого значення набуває підвищення адаптивності рослин до комплексу біотичних і абіотичних стресових факторів середовища.

Одним із пріоритетних напрямів сучасної селекції є створення сортів озимих зернових культур, які поєднують високий рівень продуктивності, екологічну пластичність та здатність формувати стабільний урожай за несприятливих умов вирощування [1; 2]. Серед численних факторів, що обмежують продуктивність озимини, важливе місце належить впливу низьких температур [3]. Значні втрати посівів можуть виникати як у зимовий період, так і ранньою весною внаслідок заморозків після відновлення вегетації рослин. Тому під час створення нових сортів особлива увага приділяється вивченню та підвищенню морозостійкості, яка є однією з визначальних складових загальної зимостійкості та адаптивного потенціалу генотипу.

Актуальність дослідження. В останні роки нестабільність погодних умов та збільшення ризику пошкодження посівів озимих культур низькими температурами зумовлюють необхідність удосконалення селекційних підходів до оцінювання вихідного матеріалу [1]. Морозостійкість рослин визначає їхню здатність переносити критичні температурні впливи без суттєвого порушення фізіолого-біохімічних процесів і втрати життєздатності [4]. Встановлено, що генотипи з високим рівнем морозостійкості часто характеризуються підвищеною стійкістю і до інших несприятливих чинників зимового періоду, зокрема випрівання, вимокання, утворення льодової кірки та різких температурних коливань [5].

Постійна трансформація кліматичних умов, зміни агротехнологій, а також необхідність прискорення селекційного процесу потребують удосконалення методів оцінювання морозостійкості та розроблення нових підходів до добору перспективних генотипів [6]. Ефективні способи діагностики стійкості до низьких температур дають змогу підвищити точність селекційного добору, скоротити тривалість створення нових сортів та забезпечити формування високопродуктивного вихідного матеріалу, адаптованого до сучасних умов вирощування [7]. У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на вдосконалення методичних підходів до оцінки морозостійкості озимих зернових культур, є актуальними як з наукової, так і з практичної точки зору.

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); «Особливості формування морозостійкості сортів пшениці м'якої озимої залежно від їх яровизаційної потреби та фотоперіодичної чутливості» (номер державної реєстрації № 0126U000077); «Генетичні та фізіологічні особливості формування цінних господарських ознак пшениці озимої в умовах змін клімату» (номер державної реєстрації № 0126U000059).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Успішне формування врожаю озимих зернових культур значною мірою залежить від умов проходження рослинами зимового періоду [8]. Саме в цей час реалізується адаптивний потенціал генотипів щодо здатності витримувати комплекс несприятливих факторів навколишнього середовища [9]. За дії низьких температур істотно уповільнюються ростові процеси, змінюється інтенсивність обміну речовин та фізіологічний стан рослин, що підвищує їхню чутливість до зимових стресів. Особливу небезпеку становлять критичні морози за недостатнього снігового покриву, різкі температурні коливання, випрівання, вимокання та випирання рослин із ґрунту [10; 11].

Дослідження останніх років свідчать, що зміни клімату супроводжуються не лише підвищенням середньорічної температури повітря, а й зростанням нестабільності погодних умов упродовж осінньо-зимового періоду [12]. Для багатьох регіонів характерними стали тривалі відлиги, які чергуються з раптовими похолоданнями, що негативно впливає на фізіологічний стан рослин та знижує їхню стійкість до подальшого впливу морозів. Додатковим чинником ризику є утворення льодової кірки, яка порушує газообмін і може спричинити значне пошкодження або загибель посівів [13].

Попри певне потепління клімату, проблема перезимівлі озимих культур залишається актуальною, оскільки несприятливі погодні умови щорічно призводять до часткової або повної втрати посівів у різних ґрунтово-кліматичних зонах. Тому морозостійкість розглядається як одна з найважливіших адаптивних ознак, що визначає здатність рослин зберігати життєздатність і продуктивність за впливу низьких температур.

За даними численних досліджень [1; 4; 6], рівень морозостійкості істотно залежить від генетичних особливостей сорту та умов його вирощування. При цьому реакція генотипів на низькотемпературний стрес може змінюватися залежно від екологічних умов регіону та особливостей погодних чинників конкретного року. Саме тому в сучасних селекційних програмах значна увага приділяється створенню сортів із високою адаптивністю до несприятливих

умов зимівлі, здатних ефективно переносити як тривалу дію низьких температур, так і їх різкі коливання протягом зимового сезону.

Наявні результати наукових досліджень [2; 5; 6] підтверджують необхідність подальшого вдосконалення як селекційних, так і агротехнологічних підходів, спрямованих на підвищення стійкості озимих культур до зимових стресових факторів. У зв'язку з цим морозостійкість залишається одним із ключових критеріїв добору вихідного матеріалу та невід'ємною складовою адаптивного потенціалу сучасних сортів озимих зернових культур.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Розробка та вдосконалення методичних підходів до оцінювання морозостійкості є невід'ємною складовою селекційного процесу зернових культур. Слід зазначити, що існує значна кількість методів добору та оцінювання морозостійкості, які відрізняються між собою залежно від мети дослідження ознаки та агрокліматичних умов зони вирощування.

Одним із традиційних підходів є польова оцінка стійкості рослин до низьких температур шляхом візуального обліку стану посівів після перезимівлі [14]. Водночас в умовах кліматичних змін і переважання м'яких зим ефективність такого підходу суттєво знижується, що ускладнює відбір дійсно морозостійкого селекційного матеріалу в природних умовах.

Більш інформативним критерієм вважають показник виживання рослин після дії критичних температур. У цьому контексті одним із найнадійніших методів є відбір монолітів [15]. Моноліти ґрунту відбирають у польових умовах за допомогою механічних пилок, при цьому кожен зразок має включати два суміжні рядки з не менше ніж 15 рослинами в кожному. Товщина моноліту становить 12–15 см, після чого зразки розміщують у ящиках розміром 30×40 см. Для оцінювання потенційної морозостійкості моноліти піддають одноразовому проморожуванню в середині зимового періоду. Найбільш об'єктивні результати отримують за умови відбору зразків у декількох точках поля. Температурний режим проморожування встановлюють відповідно до умов загартування в конкретному регіоні та біологічних особливостей досліджуваних сортів. Метод дозволяє досить точно характеризувати рівень морозостійкості, оцінювати стан рослин у польових умовах, прогнозувати їх перезимівлю та визначати динаміку критичних температур. Водночас його недоліками є низька продуктивність, значна трудомісткість і тривалість виконання.

У селекційній практиці озимих злаків також застосовують метод проморожування проростків [16]. Зволожені насіння пророщують у термостаті за температури +15...+20 °С до появи проростків довжиною 5–7 мм, після чого їх розміщують у марлевій мішечки по 100 штук і піддають поетапному загар-

туванню в ексикаторі: протягом 7 діб за температури 0...-2 °С та протягом 3 діб за -4 °С. Подальше проморожування здійснюють у міні-камерах ЛВН-200Г за температури -11...-13 °С з експозицією 24 год. Після цього зразки переносять у ростильні на вологий фільтрувальний папір, накривають склом для запобігання висиханню та через 7–10 діб визначають кількість життєздатних проростків. Перевагою методу є його відносна швидкість та можливість скорочення тривалості експерименту без суттєвого зниження точності оцінювання за умови коректного підбору температурного режиму. Основним обмеженням його широкого впровадження є необхідність використання спеціалізованого низькотемпературного обладнання.

Мета роботи – удосконалити існуючий спосіб оцінки морозостійкості зернових культур, що дасть можливість за короткий час і з необхідною вірогідністю оцінити морозостійкі зразки на різних етапах розвитку рослин.

Новизна. Удосконалено спосіб оцінювання морозостійкого селекційного матеріалу озимих зернових культур, що обумовлений дією стресового низькотемпературного чинника, спрямованого проти виживання нестійких форм. Запропонований спосіб охороняється патентом на корисну модель (№ 163356 від 17.06.2026, бюл. № 24) [17]. Новим є те, що оцінювання генотипів проводять у висівних ящиках при дії різних температурних режимів морозильної камери КНТ-1 на рослини, отриманих за сівби насіння у строки 15.09, 25.09, 05.10, 15.10, за схемою: -16 °С, -18 °С, -20 °С (для пшениці м'якої озимої); -14 °С, -16 °С, -18 °С (для пшениці твердої озимої); -12 °С, -14 °С (для ячменю озимого); -18 °С, -20 °С (для тритикале озимого).

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований спосіб оцінки морозостійкості зернових культур на різних етапах розвитку рослин розширює наявну методологічну базу та сприяє створенню нових сортів із цінними господарськими ознаками. Метод може бути впроваджений у практику селекційних центрів, науково-дослідних установ та дослідних станцій.

Виклад основного матеріалу. Найбільш близьким по технічній суті є аналогічний спосіб, згідно якого оцінювання морозостійкості генотипів проводять методом прямого проморожування рослин у висівних ящиках [18]. Даний спосіб прийнято за найближчий аналог. Ящики розміром 30×40 см і глибиною 12–15 см заповнюють звичайним просіяним ґрунтом на 3–4 см нижче верхнього краю. Поверхню ґрунту вирівнюють та маркують на рядки. Дослідний матеріал висівають у ящики, в рядки через 3–4 см по 20–25 насінин у кожному і засипають зверху ґрунтом на 3 см. У кожному ящику висівають по 2 рядки сорту-еталону. Весь період осені і початку зими рослини перебувають у природних умовах, де проходять першу та другу фази загартування. Догляд за росли-

нами полягає у систематичному поливі, підживленні та боротьбі зі шкідниками. В подальшому ящики поміщають в низькотемпературні камери для проморожування.

Проте недоліком вказаного методу є те, що сівбу селекційного матеріалу проводять лише у один строк. У зв'язку з цим всі рослини на час проморожування знаходяться на одному й тому ж етапі органогенезу, який може виявитися недостатньо оптимальним для цього. Окрім того, в окремі роки через підвищений температурний режим осінньо-зимового періоду рослини можуть не повністю пройти необхідні фази загартування. Як наслідок, вони стають менш морозостійкими, а тому після прямого проморожування у камерах низьких температур можуть повністю втратити свою життєздатність. В такому разі досить складно провести об'єктивне оцінювання морозостійкості рослин.

В основу корисної моделі поставлене завдання удосконалити існуючий спосіб оцінювання морозостійкості селекційного матеріалу озимих зернових культур, що дасть можливість більш ґрунтовно, якісно і поглиблено оцінити стійкість рослин до низьких температур на різних етапах розвитку.

Запропонований спосіб включає нижче перераховані процеси (рис. 1). З родючого шару ґрунту і промитого річкового піску готують ґрунтосуміш. Для цього ґрунт і пісок просівають крізь дріт'яне сито та

ретельно перемішують у співвідношенні 3:1. Висівні ящики заповнюють шаром підготовленої ґрунтосуміші завтовшки 6–7 см, злегка ущільнюють трамбівкою, після чого на поверхні за допомогою маркера створюють чарунки (рядки) глибиною до 1 см.

Сівбу селекційного матеріалу проводять у чотири строки: 15.09, 25.09, 05.10 та 15.10. Використовують виповнене насіння однієї репродукції та однакової фракції, яке викладають за допомогою пінцета у рядки паралельно ширині ящика. В кожному ящику висівають по 3 сорти, що оцінюються, а також сорт-еталон зі стійкістю вище середньої. Сорт займає 3 рядки, кожен рядок є окремою повторністю. Всього має бути 12 рядків по 20 насінин у кожному. Висіане насіння засипають шаром ґрунтосуміші товщиною 3–4 см, злегка ущільнюють трамбівкою та поливають. Ящики розміщують на вегетаційному майданчику з твердим покриттям. У період осені та початку зими рослини перебувають у природних умовах, де проходять першу і другу фази загартування. Догляд за рослинами полягає у регулярному поливі. За настання строку проморожування ящики переносять у низькотемпературні камери КНТ-1М. За умови, якщо середньодобова температура повітря зовні недостатньо набувала від'ємних значень – необхідно провести додаткове загартування рослин за контрольованих умов. Для цього ящики в камері витримують за схе-



Рис. 1. Поетапна схема оцінювання морозостійкості озимих зернових культур на різних етапах розвитку

мою: +1 °С – 12 год; -4 °С – 12 год. Подальше проморожування починають з температури, що відповідає навколишньому середовищу, поступово знижують (з інтервалом 2 °С за 1 год) до заданої і при її досягненні рослини витримують у камері тривалістю 24 год. Для визначення фаз розвитку рослин додатково проводять сівбу насіння сортів-еталонів під кожен строк (4 строки сівби – 4 ящики). При оцінюванні зразків рекомендовано задавати наступні параметри температури залежно від культури: -16 °С, -18 °С, -20 °С (для пшениці м'якої озимої); -14 °С, -16 °С, -18 °С (для пшениці твердої озимої); -12 °С, -14 °С (для ячменю озимого); -18 °С, -20 °С (для тритикале озимого). Після проморожування температуру у камері поступово підвищують (на 2 °С за 1 год) до позначки 0 °С. Ящики на одну добу залишають у камері для поступового розмерзання, після чого їх переносять в приміщення з температурою +18 °С для подальшого відрощування. Через 2 доби рослини підстригають так, щоб залишилась листкова пластинка довжиною 0,5 см. Строк обліку настає через 15–16 діб від початку відрощування. До життєздатних відносять тургорні зелені рослини, які мають приріст листків довжиною не менше 5 см. Кількість життєздатних і загиблених рослин визначають по кожному рядку окремо. Отримані результати виражають у відсотках як співвідношення життєздатних рослин до їх загального числа.

Головні висновки. У ході проведеного дослідження модифіковано та вдосконалено спосіб оці-

нювання морозостійкості селекційного матеріалу озимих зернових культур на різних етапах розвитку рослин. Виконано порівняльний аналіз існуючих методів визначення стійкості зразків зернових культур до дії низьких температур. Узагальнення літературних джерел показало, що для визначення морозостійкості застосовується значна кількість методик, які базуються на різних принципах, кожна з яких має як переваги, так і певні обмеження. Водночас більшість із них не відповідає сучасним вимогам, що обумовлює актуальність розроблення нових та удосконалення наявних методів діагностики. Перевагою запропонованого методу є можливість оцінювання селекційного матеріалу на різних етапах органогенезу рослин, що забезпечує більш об'єктивне визначення рівня морозостійкості незалежно від особливостей перебігу осінньо-зимового періоду. На відміну від існуючих підходів, метод знижує ризик отримання недостовірних результатів, пов'язаних із недостатнім загартуванням рослин та їх повною загибеллю під час проморожування.

Перспективи використання результатів дослідження. Застосування запропонованого методу в селекції озимих зернових культур сприятиме створенню нових сортів із цінними господарськими ознаками. Удосконалений спосіб дозволить більш повно реалізувати генетично обумовлений потенціал продуктивності досліджуваних генотипів, що забезпечить їх ефективніше використання як у рослинництві, так і в селекції.

Література

1. Кириленко В.В., Гуменюк О.В., Дергачов О.Л. та ін. Методи підвищення морозо-, зимостійкості пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) в умовах Лісостепу України. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2015. Т. 16. С. 120–124.
2. Польовий А.М., Блищик Д.В., Феоктістов П.О. Динамічна модель формування зимостійкості рослинами озимої пшениці на території Південного Степу України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2014. № 14. С. 105–111.
3. Chaudhry S., Sidhu G.P.S. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: A comprehensive review. *Plant Cell Reports*. 2022. Vol. 41. Iss. 1. P. 1–31.
4. Пірич А.В. Морозостійкість нових сортів пшениці м'якої озимої миронівської селекції. *Миронівський вісник*. 2018. Вип. 7. С. 85–92.
5. Моргун В.В., Логвиненко В.Ф. Селекція сортів озимої пшениці на високу зимо- та морозостійкість. *Фізіологія рослин в Україні на межі тисячоліть*. Київ: Логос, 2001. Т. 2. С. 204–211.
6. Дубовий В.І., Воробйов В.І., Рябчук О.П. Еволюція способів оцінки та добору рослин пшениці озимої із підвищеною морозо- і зимостійкістю в умовах Лісостепу України. *Агробіологія*. 2024. № 1. С. 206–212.
7. Сергєєва Л., Хоменко Л., Броннікова Л. (2018). Біотехнологія пшениці. Нові підходи до оцінювання морозостійкості генотипів пшениці озимої. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. Біологічні науки*. 2018. № 8 (381). С. 23–27.
8. Soleimani B., Lehnert H., Babben S. et al. Genome wide association study of frost tolerance in wheat. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12. Iss. 1. 5275.
9. Armoniene R., Liatukas, Z. Brazauskas G. Evaluation of freezing tolerance of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under controlled conditions and in the field. *Zemdirbyste-Agriculture*. 2013. Vol. 100. P. 417–424.
10. Литвиненко М.А., Лифенко С.П. Вплив строків сівби і сублетальних зимових температур на виживаність та врожайність озимої пшениці. *Вісник аграрної науки*. 2004. № 5. С. 27–31.
11. Балабух В.О. Однолеток Л.П., Кривошеїн О. Вплив зміни клімату на продуктивність озимої пшениці в Україні у періоди вегетаційного циклу. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. № 3. Вип. 46. С. 72–85.
12. Базалій В.В., Домарацький Є. О., Базалій Г. Г. та ін. Наукові основи селекції озимої пшениці на агроєкологічну адаптивність : монографія. Миколаїв : МНАУ, 2024. 244 с.
13. Феоктістов П.О., Блищик Д.В., Нагуляк О.І. Вплив змін погодних умов на формування морозостійкості рослин озимої пшениці в Одеській області. *Насінництво*. 2013. № 6. С. 7–9.
14. Методика державного сорто випробування сільськогосподарських культур / за ред. В.В. Волкодава. 2000. Київ : Алефа, С. 10–50.

15. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В. та ін. Методи оцінки морозостійкості селекційного матеріалу пшениці. *Екологічні науки*. 2021. № 2 (35). С. 82–89.
16. Пикало С.В., Демидов О.А., Юрченко Т.В. та ін. Розроблення способів оцінки та добору генотипів зернових культур на стійкість до абіотичних стресових чинників. *Екологічні науки*. 2020. № 5(32). С. 175–184.
17. Спосіб оцінки морозостійкості зернових культур на різних етапах розвитку рослин: пат. 163356 Україна: МПК А01Н1/04, А01G22/20. No 202502108; заявл. 05.05.2025; опубл. 17.06.2026, Бюл. № 24.
18. Пшениця озима. Метод визначення морозостійкості сортів: ДСТУ 4749:2007. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 8 с.

Дата першого надходження статті до видання: 01.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

УДК 504.3.054:551.510.42:311(477.74)
DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.23>

СТАТИСТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ NO_2 В УРБАНІЗОВАНОМУ СЕРЕДОВИЩІ (НА ПРИКЛАДІ М. ОДЕСА)

Владимирова О.Г., Тимошук М.О., Гарабазій Т.А., Бургаз О.А.
Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса

veg2008@ukr.net, marinodessa@gmail.com, environ65odessa@gmail.com, alexburgaz84@gmail.com

Статтю присвячено комплексному статистичному аналізу та оцінці просторово-часової динаміки вмісту діоксиду азоту (NO_2) в атмосферному повітрі великого урбанізованого центру та транспортного вузла – м. Одеса. Актуальність роботи обумовлена високим антропогенним тиском на повітряний басейн міста та необхідністю оцінювання стану екологічної безпеки на основі статистичних методів. Дослідження базується на масиві даних строкових спостережень, отриманих на пунктах спостереження за забрудненням атмосферного повітря (ПСЗ) протягом 2017–2021 рр. Методологія охоплює перевірку однорідності рядів, розрахунок статистичних параметрів розподілу (математичне сподівання, середнє квадратичне відхилення, асиметрія, ексцес) за допомогою комплексу STATISTICA та побудову емпіричних гістограм.

Порівняльний аналіз зафіксував синхронні щомісячні зміни рівня NO_2 на тлі поступового зменшення загального забруднення повітря. Встановлено чітку просторову диференціацію міської території за двома типами екологічного стану. Перший тип репрезентує умовно референтна прибережна зона (ПСЗ № 8), де середні концентрації перебувають у межах санітарно-гігієнічного нормативу (87% від ГДК_{сд}), проте фіксується стійкий аптренд забруднення, що вказує на поширення техногенного тиску на рекреаційні локації. Другий тип формує деструктивний промислово-транспортний кластер (ПСЗ № 10–20), де рівні хронічно перевищують санітарно-гігієнічний норматив в 1,5–1,65 рази. Наявність від’ємної асиметрії верифікує безперервний характер високого забруднення, за якого стан чистоти повітря є аномальним винятком. Максимальний рівень акумуляції NO_2 ідентифіковано на ПСЗ № 18 (вул. Балківська), де екстремуми сягають значення 1,96 ГДК_{сд}.

Практичне значення результатів полягає у можливості їх імплементації в діяльність органів місцевого самоврядування, суб’єктів моніторингу та природоохоронних установ для модернізації систем екологічного контролю, оптимізації транспортних потоків та побудови моделей предиктивного аналізу міського середовища. *Ключові слова:* діоксид азоту, атмосферне повітря, статистичні параметри, моніторинг, асиметрія, ексцес, ГДК_{сд}, урбоекосистема, м. Одеса.

Statistical patterns of the spatial distribution of NO_2 in an urban environment (using the city of Odesa as an example).
Vladymyrova O., Timoshchuk M., Garabagii T., Burhaz O.

The article is devoted to a comprehensive statistical analysis and assessment of the spatio-temporal dynamics of nitrogen dioxide (NO_2) concentrations in the atmospheric air of a large urban center and transportation hub – Odesa, Ukraine. The relevance of the study is determined by the high anthropogenic pressure on the city’s air basin and the need to assess the state of environmental safety using statistical methods. The research is based on a dataset of routine observations obtained at air pollution monitoring stations (APMSs) during the period 2017–2021. The methodology includes testing the homogeneity of the observation series, calculating statistical distribution parameters (mean, standard deviation, skewness, and kurtosis) using the STATISTICA software package, and constructing empirical histograms.

Comparative analysis revealed synchronous monthly variations in NO_2 concentrations against the background of a gradual decline in the overall level of air pollution. A clear spatial differentiation of the urban area into two types of environmental conditions was identified. The first type is represented by the relatively reference coastal zone (APMS No.8), where average concentrations remain within the sanitary standard (87% of the maximum permissible average daily concentration, MPCad). However, a persistent upward trend in pollution was detected, indicating the expansion of anthropogenic pressure into recreational areas. The second type is represented by a heavily polluted industrial and transport cluster (APMSs No.10–20), where concentration levels chronically exceed the sanitary standard by 1.5–1.65 times. The presence of negative skewness confirms the continuous nature of elevated pollution levels, under which clean air conditions become an anomalous exception. The highest level of NO_2 accumulation was identified at APMS No.18 (Balkivska Street), where peak concentrations reached 1.96 MPCad.

The practical significance of the obtained results lies in their potential implementation by local self-government authorities, environmental monitoring agencies, and environmental protection institutions for the modernization of environmental monitoring systems, optimization of traffic flows, and development of predictive models of the urban environment. *Key words:* nitrogen dioxide, atmospheric air, statistical parameters, monitoring, skewness, kurtosis, maximum permissible average daily concentration (MPCad), urban ecosystem, Odesa.



Постановка проблеми. Високий рівень антропогенного тиску на повітряне середовище Одеси зумовлений її статусом потужного індустріального центру, густонаселеної агломерації та ключового транспортно-логістичного вузла. Маючи населення понад 1 мільйон мешканців та щільність міської забудови на рівні 6226,6 осіб/км² (що позиціонує місто серед лідерів в Україні) [1], Одеса характеризується складною екологічною ситуацією. Вона формується під впливом численних стаціонарних об'єктів та прогресуючої автомобілізації. Одним з головних деструктивних чинників є наявність діоксиду азоту (NO_2) – токсикант 3-го класу небезпеки, чий вміст в атмосферному повітрі регулярно фіксується з перевищенням встановленого середньодобового санітарно-гігієнічного нормативу ($ГДК_{сд} = 0,04$ мг/м³).

Актуальність дослідження. Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю об'єктивної оцінки сучасного стану повітряного середовища на основі високоточних статистичних методів, що дозволяє виявити приховані тренди та локалізувати зони максимального техногенного ризику.

Мета роботи. Проведення комплексного статистичного аналізу та оцінки просторово-часової динаміки вмісту діоксиду азоту в атмосферному повітрі м. Одеса на основі даних державного моніторингу за станом атмосферного повітря за п'ятирічний період (2017–2021 рр.).

Методи дослідження. Методологія дослідження базувалася на статистичній обробці даних, що включала перевірку однорідності сукупності та розрахунок базових показників. Для розрахунку статистичних оцінок моментів розподілу рядів використовувався програмний комплекс STATISTICA [2].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в рамках пріоритетного наукового напрямку діяльності кафедри екологічного права і контролю Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова [3–9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналізуючи літературні джерела з питань забруднення атмосферного повітря [5–6, 8–15] можна стверджувати, що рівень урбанізації в Україні, що досяг 69,7% у 2022 році, зумовлює критичну концентрацію промислових та транспортних вузлів, створюючи аномальний тиск на атмосферну безпеку.

Моніторинг атмосферного повітря є базовим елементом забезпечення стійкості урбосистем та збереження громадського здоров'я. Синергетичний ефект високої щільності населення, інтенсивної забудови та концентрації техногенного навантаження масштабує локальні екологічні експеси до рівня загальноміських загроз. Основним деструктивним чинником виступає автотранспорт, чий емісії акумулюються у приземному шарі атмосфери під впливом термічних бар'єрів «теплових островів». Додатковим кри-

тичним фактором дестабілізації екологічної безпеки стала військова агресія РФ. Вона спровокувала як пряме пірогенне забруднення, так і гострий дефіцит оперативних моніторингових даних. За таких умов нівелювання воєнно-техногенних викликів потребує імплементації стратегії превентивного екологічного менеджменту на основі верифікованих наукових параметрів.

Результати досліджень. В даному дослідженні, нами було опрацьовано ряди строкових вимірювань концентрацій забруднювальних речовин, отримані на пунктах спостереження за забрудненням атмосферного повітря міста Одеса протягом 2017–2021 років. Згідно методології дослідження, вихідна інформація була перевірена на однорідність, сформовано середньомісячні ряди концентрацій забруднювальної речовини. На основі цих рядів були побудовані графіки середньомісячних концентрацій діоксиду азоту (мг/м³) на ПСЗ м. Одеса (рис. 1). Результати спостережень свідчать про високий ступінь синхронності динаміки вмісту діоксиду азоту. Водночас зафіксовано тенденцію до латентного зниження концентрацій зазначеної домішки в атмосферному повітрі.

У таблиці 1 систематизовано результати розрахунку статистичних параметрів розподілу середньомісячних концентрацій діоксиду азоту на постах спостереження за забрудненням м. Одеса. На основі їх компаративного аналізу встановлено такі закономірності:

- мінімальний рівень антропогенного навантаження притаманний ПСЗ № 8, де зафіксовано найнижче математичне сподівання ($\bar{x} = 0,035$ мг/м³). Формування мінімальних концентрацій NO_2 у цій локації обумовлене її просторовою ізоляцією від потужних промислових джерел та магістральних автошляхів із високою інтенсивністю транспортних потоків;

- максимальні показники акумуляції поллютанту характерні для ПСЗ № 18, 16 та 10. Зокрема, на ПСЗ № 18 експериментально визначено найвищу середню концентрацію ($\bar{x} = 0,066$ мг/м³) та екстремальний максимум $x_{max} = 0,078$ мг/м³). На постах № 10, 15 і 16 також простежується хронічно високий рівень середніх концентрацій, що перевищує порогове значення (понд 0,061 мг/м³);

- показники середнього квадратичного відхилення (S_x) за всіма постами спостереження характеризуються низькою амплітудою варіації та однорідністю, перебуваючи в діапазоні 0,0055–0,0069 мг/м³;

- одержані значення свідчать про стаціонарний характер забруднення атмосферного повітря діоксидом азоту в межах кожної локації. Відсутність експресивних стохастичних коливань у міжмісячній динаміці вказує на формування індивідуального стабільного рівня техногенного навантаження для кожного ПСЗ;

- відсутність моди (Mo) верифікує континуальний характер трансформації концентрацій

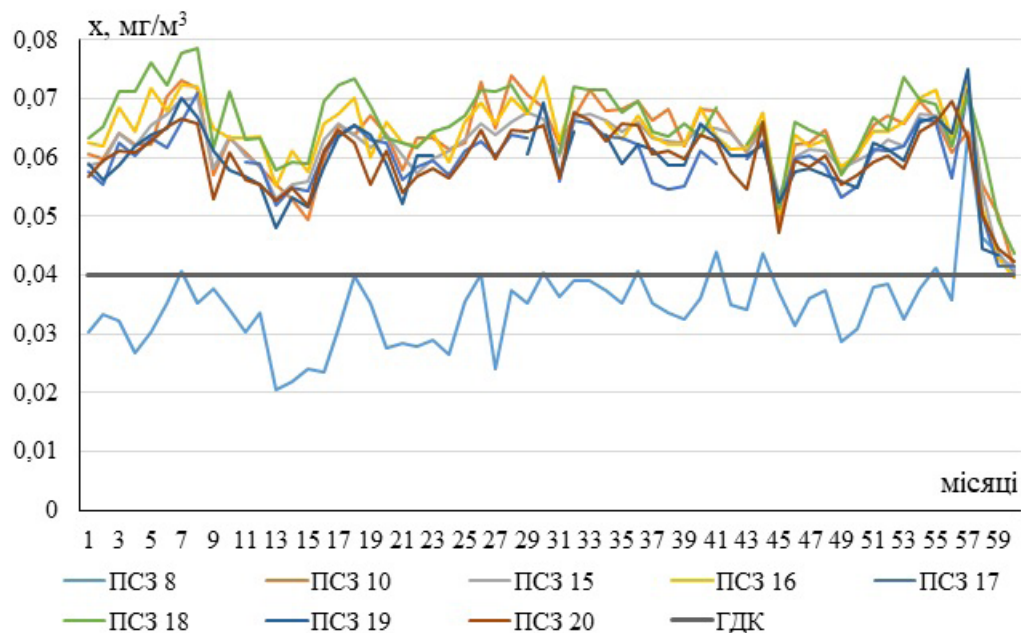


Рис. 1. Ряди середньомісячних концентрацій діоксиду азоту (мг/м³) на ПСЗ м. Одеса. 2017–2021 рр.

Таблиця 1

Статистичні моменти розподілу середньомісячної концентрації діоксиду азоту (мг/м³) на ПСЗ м. Одеса (2017–2021 рр.)

ПСЗ№	n	x_{min}	x_{max}	$\bar{x}$	S_x	As	E
8	60	0,020395	0,064096	0,034821	0,006867	0,99	4,57
10	60	0,041073	0,073898	0,063207	0,006323	-1,04	1,87
15	60	0,041233	0,072864	0,061981	0,005496	-1,54	4,33
16	59	0,039538	0,073582	0,063800	0,006370	-1,62	4,28
17	56	0,041544	0,071508	0,059592	0,005713	-0,94	2,2
18	58	0,043558	0,078529	0,065938	0,006482	-0,91	1,97
19	53	0,043294	0,075105	0,059888	0,005887	-0,46	1,34
20	60	0,042188	0,069571	0,059644	0,005589	-0,91	1,07

поллютанта, детермінований комплексною дією метеорологічних чинників (швидкість і напрямок вітру, температурний режим, явища температурної інверсії) та флуктуаціями інтенсивності емісії викидів;

– ПСЗ № 8 вирізняється правосторонньою асиметрією ($As=0,99$) та високим ексцесом ($E=4,57$). У межах цього відносно референтного («чистого») поста протягом більшої частини річного циклу утримуються низькі значення вмісту NO_2 . Проте високий ексцес у поєднанні з подовженою правою асимптотою розподілу фіксує наявність низькочастотних, але інтенсивних екстремальних сплесків забруднення, зумовлених несприятливими метеорологічними умовами розсіювання (термічна інверсія, штиль) або сезонним зростанням автотранспортного навантаження;

– ПСЗ № 15, 16, 10, 18, 20 характеризуються від'ємною (лівосторонньою) асиметрією (від -0,46 до -1,62), що свідчить про зміщення модального інтервалу розподілу в зону високих значень. Це підтверджує хронічно високий рівень контамінації повітряного басейну, де мінімальні концентрації мають характер аномальних флуктуацій. Найбільш критична екологічна ситуація ідентифікована на ПСЗ № 15 ($As=-1,54$, $E=4,33$) та ПСЗ № 16 ($As=-1,62$, $E=4,28$), де спостерігається ефект акумуляції та пролонгованої фіксації концентрацій на критичних рівнях із подальшим стрімким градієнтом спаду, що визначає стан нормативного очищення повітря як репрезентативний виняток.

Порівняльний аналіз одержаних результатів із чинними санітарно-гігієнічними нормативами дає змогу диференціювати дві полярні екологічні ситу-

ації в зоні моніторингу. Локація ПСЗ № 8 характеризується відносно сприятливим аерохімічним режимом із дискретними епізодами експесивного забруднення. Натомість кластер постів № 10–20 (із пролонгованою амплітудою на ПСЗ № 15, 16, 18) репрезентує персистентно деструктивний екологічний стан із високим рівнем акумуляції діоксиду азоту, за якого потенціал природного самоочищення атмосфери є недостатнім.

ПСЗ № 8 є єдиним пунктом спостереження, де екологічна ситуація ідентифікується як умовно стабільна, проте з наявними ознаками потенційного екологічного ризику. Розраховане середнє значення становить $0,034821 \text{ мг/м}^3$, що не перевищує нормативний поріг і становить приблизно 87% від середньодобової гранично допустимої концентрації (ГДК_{сд}). Отже, інтегральний екологічний фон у цій локації відповідає критеріям допустимого. Мінімальне зафіксоване значення знижується до $0,020395 \text{ мг/м}^3$ (удвічі менше за ГДК_{сд}), що верифікує періоди релаксації атмосферного повітря. Водночас максимальний показник досягає $0,064096 \text{ мг/м}^3$, що перевищує межу ГДК_{сд} у 1,6 раза.

Кластер постів № 10–20 перебуває в стані хронічного критичного антропогенного навантаження. Середні величини концентрацій на всіх об'єктах цієї групи суттєво перевищують нормативні ліміти. Найвищий рівень екологічного напруження зафіксовано на ПСЗ № 18, де середній показник перевищує ГДК_{сд} у 1,65 раза. Навіть на найменш забрудненому пості цієї групи (ПСЗ № 17) середня концентрація становить $0,059592 \text{ мг/м}^3$, що перевищує норматив в 1,5 раза.

Констатовано, що навіть у періоди максимальної інтенсифікації процесів самоочищення повітряного басейну, вміст діоксиду азоту практично не опускається нижче референтного ліміту. На ПСЗ № 10, 15, 17, 20 мінімальні екстремуми локалізуються на рівні ГДК_{сд} ($0,041\text{--}0,042 \text{ мг/м}^3$), а на ПСЗ № 18 навіть абсолютний мінімум ($0,043558 \text{ мг/м}^3$) перевищує норму. Це підтверджує безперервний та хронічний характер забруднення.

Максимальні концентрації в межах зазначеного кластера сягають діапазону $0,069\text{--}0,078 \text{ мг/м}^3$, що еквівалентно майже двократному перевищенню ГДК_{сд} (зокрема, для ПСЗ № 18 коефіцієнт кратності перевищення становить 1,96).

В ході дослідження були побудовані гістограми емпіричного розподілу середньомісячних концентрацій досліджуваної домішки на постах спостереження міста.

Розраховані статистичні параметри рядів середньомісячних концентрацій та побудовані емпіричні

гістограми розподілу дають змогу констатувати, що в середньому по місту найбільш імовірні модальні значення вмісту діоксиду азоту локалізуються в діапазоні від $0,05$ до $0,07 \text{ мг/м}^3$, що еквівалентно $1,25\text{--}1,75 \text{ ГДК}_{сд}$.

Окремого наукового аналізу потребує часовий ряд концентрацій, зафіксованих на ПСЗ № 8. Упродовж досліджуваного періоду (2017–2021 рр.) рівень контамінації атмосферного повітря діоксидом азоту в районі розташування цього поста переважно не перевищував встановлений санітарно-гігієнічний норматив. Проте, на відміну від решти пунктів спостереження, для ПСЗ № 8 ідентифіковано стійку тенденцію до зростання експериментальних значень концентрацій протягом усього ретроспективного періоду дослідження.

Висновки. Низька варіація показників S_x верифікує хронічний характер та стабільний рівень індивідуального техногенного навантаження NO_2 на атмосферу міста.

Виявлено полярність між референтною зоною (ПСЗ № 8; $\bar{x} = 0,87 \text{ ГДК}_{сд}$) та деструктивним промислово-транспортним кластером (ПСЗ № 10–20; перевищення ГДК_{сд} в $1,5\text{--}1,65$ раза).

Від'ємна асиметрія за більшістю ПСЗ доводить персистентну акумуляцію полютанта у високих діапазонах, визначаючи стан нормативної чистоти повітря як аномальний виняток.

На тлі загального латентного зниження концентрацій NO_2 по місту, на ПСЗ № 8 ідентифіковано стійкий аптренд, що фіксує експансію техногенного тиску на рекреаційні зони.

Максимальний рівень контамінації притаманний ПСЗ № 18, де екстремуми досягають $1,96 \text{ ГДК}_{сд}$, а мінімальні значення стабільно перевищують санітарний норматив.

Перспективи використання результатів дослідження. З нашої точки зору, наукові положення та прикладні висновки дослідження можуть бути безпосередньо імплементовані в діяльність органів місцевого самоврядування, суб'єктів державного екологічного моніторингу та природоохоронних установ. Прогностичний потенціал та аналітичні дані роботи слугуватимуть підґрунтям для модернізації локальних систем екологічного контролю та оптимізації мережі моніторингу атмосферного повітря, розроблення науково обґрунтованих схем реорганізації міських транспортних потоків з метою зниження логістичного навантаження, стратегічного планування та верифікації комплексних природоохоронних заходів у межах урбанізованих територій.

Література

1. Сайт Головного управління статистики в Одеській області. Населення та міграція. URL: http://od.ukrstat.gov.ua/arh/demogr/demogr1_10_2021.htm.
2. Фетісов В.С. Пакет статистичного аналізу даних STATISTICA: навчальний посібник. Ніжин. НДУ ім. М. Гоголя. 2018. 114 с.
3. Лосева І.Д., Снісаренко В.В. Часові зміни концентрації діоксиду азоту в атмосферному повітрі м. Одеса. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Географічні науки*. 2017. Вип 7. С. 173-178.
4. Просторово-часова оцінка і діагноз стану забруднення атмосферного повітря м. Одеса. Звіт про науково-дослідну роботу. № держреєстрації 0117U002426. Одеса. ОДЕКУ. 2020 р. 115 с.
5. Владимирова О.Г., Бургаз О.А., Тимошук М.О. Особливості забруднення атмосферного повітря м. Одеси діоксидом сірки й оксидом вуглецю. *Екологічні науки*. 2021. № 7 (34). С. 44-50.
6. Бургаз О.А., Самойленко В.О. Щодо питань здійснення державного екологічного моніторингу атмосферного повітря міста Одеса. *Матеріали Третьої Всеукраїнської науково-практичної конференції «Євроінтеграція екологічної політики України»*. Одеса. ОДЕКУ. 2021. С. 101-104.
7. Дослідження відповідності значення ІЗА екологічному стану атмосферного повітря міста. Звіт про науково-дослідну роботу (проміжний). Одеса. ОДЕКУ. 2023 р. 56 с.
8. Бургаз О.А., Гарабазій Т.А., Тимошук М.О. Огляд стану забруднення атмосферного повітря міста Одеса за даними маршрутних спостережень. *Екологічні науки*. 2024. № 4(55). С. 16-21. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.4-55.2>
9. Бургаз О.А., Тимошук М.О. Особливості забруднення атмосферного повітря міста Одеса фенолом. *Nature conservation as an essential prerequisite for preserving humanity: International scientific conference*. Riga, Latvia. Baltija Publishing. 2025. Р. 33-36. DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-541-9-7>
10. Савенець М.В., Дворецька І.В., Козленко Т.В., Комісар К.М., Уманець А.П., Жемера Н.С. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 1: приземний вміст забруднюючих речовин. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 31. С. 69-87.
11. Белоконь К., Пірогова І., Мальований М., Тарабан Є. Оцінка якості атмосферного повітря міста Запоріжжя. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2024. № 3, С. 39-48, DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2024-4-6>.
12. Мільович С.С., Галла-Бобик С.В., Ченчак М.М. Динаміка зміни стану атмосферного повітря тилового міста (на прикладі м. Львова). *Екологічні науки*. 2026. № 1(64). С. 40-45. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.1-64.5>
13. Степова О.В., Корнішина А.О., Трістан А.В. Аналіз забруднення атмосферного повітря від автомобільного транспорту (на прикладі Шевченківського району м. Полтава). *Екологічні науки*. 2022. № 5(44). С. 18-25. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.5-44.2>
14. Савенець, М., Надточій, Л., Козленко, Т., Комісар, К., Уманець, А., Грама, Д., Жемера, Н., Крайник, С., Рудас, М. Оціночний звіт: Наслідки повномасштабного російського вторгнення для якості атмосферного повітря в Україні (24.02.2022–24.02.2026). Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. 2026. 51 с.
15. Кузик А.Д., Думас І.З., Олійник О.Т. Забруднення атмосферного повітря автомобільним транспортом на в'їздах до м. Львова. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. 2024. № 29. С. 12-23. DOI [10.32447/20784643.29.2024.02](https://doi.org/10.32447/20784643.29.2024.02).

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ВІЙСЬКОВІ ДІЇ ЯК ЧИННИК ДЕГРАДАЦІЇ УРБАНІЗОВАНИХ ЕКОСИСТЕМ

Сакун А.О., Кутковий Д.О.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

Antonina.Sakun@khpi.edu.ua, Denys.Kutkovyi@mit.khpi.edu.ua

Військові дії є одним із найсильніших антропогенних чинників трансформації навколишнього природного середовища, наслідки яких особливо гостро проявляються в межах урбанізованих територій. Руйнування житлової, транспортної, енергетичної та промислової інфраструктури супроводжується значним навантаженням на всі компоненти міських екосистем, що призводить до погіршення стану атмосферного повітря, забруднення ґрунтів і водних об'єктів, скорочення площ зелених насаджень та зниження рівня біорізноманіття. У статті досліджено основні механізми деградації урбанізованих екосистем під впливом військових дій та проаналізовано їх екологічні наслідки. Визначено ключові джерела надходження забруднювальних речовин у довкілля, серед яких вибухи боєприпасів, пожежі, руйнування будівель і споруд, пошкодження промислових підприємств, об'єктів енергетики та систем життєзабезпечення.

Розглянуто особливості впливу воєнних дій на атмосферне повітря, ґрунтовий покрив, поверхневі та підземні води, а також на рослинний і тваринний світ міських територій. Встановлено, що накопичення важких металів, нафтопродуктів, продуктів горіння та будівельних відходів спричиняє довготривале погіршення екологічного стану урбанізованих територій і створює додаткові ризики для здоров'я населення. Особливу увагу приділено необхідності проведення комплексної екологічної оцінки територій, що зазнали воєнного впливу, з використанням системи показників стану окремих компонентів довкілля.

Обґрунтовано доцільність впровадження інтегрованого підходу до моніторингу наслідків військових дій, який дозволяє своєчасно виявляти екологічні загрози та визначати пріоритетні напрями природоохоронних заходів. Показано, що ефективне відновлення урбанізованих екосистем потребує поєднання заходів з екологічного моніторингу, рекультивації забруднених земель, відновлення зеленої інфраструктури та впровадження принципів сталого розвитку під час повоєнної відбудови територій. *Ключові слова:* військові дії, урбанізовані екосистеми, деградація екосистем, екологічні наслідки, забруднення атмосферного повітря, забруднення ґрунтів.

Military actions as a factor of urban ecosystem degradation. Sakun A., Kutkovyi D.

Military actions are among the most significant anthropogenic factors causing environmental transformation, with their impacts being particularly pronounced within urbanized areas. The destruction of residential, transport, energy, and industrial infrastructure imposes substantial pressure on all components of urban ecosystems, resulting in the deterioration of air quality, contamination of soils and water bodies, reduction of green spaces, and loss of biodiversity. This article examines the main mechanisms of urban ecosystem degradation caused by military activities and analyzes their environmental consequences. The key sources of pollutant release into the environment are identified, including ammunition explosions, fires, the destruction of buildings and structures, and damage to industrial facilities, energy infrastructure, and life-support systems.

The study considers the specific impacts of military actions on atmospheric air, soil cover, surface and groundwater resources, as well as the flora and fauna of urban areas. It has been established that the accumulation of heavy metals, petroleum products, combustion by-products, and construction debris leads to long-term deterioration of environmental conditions in urbanized territories and creates additional risks to public health. Particular attention is paid to the necessity of conducting a comprehensive environmental assessment of territories affected by military activities using a system of indicators that characterize the condition of individual environmental components.

The feasibility of implementing an integrated approach to monitoring the environmental consequences of military actions is substantiated, as such an approach enables the timely identification of environmental threats and the determination of priority areas for environmental protection measures. It is demonstrated that the effective restoration of urban ecosystems requires a combination of environmental monitoring, remediation of contaminated lands, rehabilitation of green infrastructure, and the implementation of sustainable development principles during post-war reconstruction. *Key words:* military actions, urban ecosystems, ecosystem degradation, environmental consequences, air pollution, soil contamination.

Постановка проблеми. Військові дії є одним із найбільш масштабних чинників антропогенного впливу на навколишнє природне середовище, що спричиняє значні зміни у функціонуванні екосистем та порушення екологічної рівноваги. Особливо вразливими до таких впливів є урбанізовані території, де висока концентрація населення, промислових об'єктів, транспортної та енергетичної інфраструктури

зумовлює виникнення комплексних екологічних ризиків. Руйнування будівель і споруд, пошкодження промислових підприємств, виникнення пожеж, вибухи боєприпасів та утворення значних обсягів відходів руйнувань призводять до інтенсивного забруднення атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів, а також негативно впливають на стан біорізноманіття та зелених насаджень.



Актуальність дослідження. Сучасні військові конфлікти супроводжуються значними екологічними наслідками, які охоплюють усі компоненти навколишнього природного середовища та становлять загрозу для екологічної безпеки територій. Особливо гостро ця проблема проявляється в урбанізованих екосистемах, де поєднання високої щільності населення, концентрації промислових об'єктів і розвинутої інфраструктури зумовлює масштабність негативних наслідків військових дій. Руйнування житлових кварталів, підприємств, об'єктів енергетики та транспортної мережі призводить до погіршення якості атмосферного повітря, забруднення ґрунтів і водних ресурсів, зниження рівня біорізноманіття та порушення екологічної стійкості міських територій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах сучасного наукового напрямку, пов'язаного з оцінкою екологічних наслідків антропогенного впливу на навколишнє природне середовище та забезпеченням екологічної безпеки урбанізованих територій. Авторський доробок спрямований на вирішення актуального науково-практичного завдання щодо визначення особливостей деградації урбанізованих екосистем під впливом військових дій, виявлення основних джерел забруднення компонентів довкілля та оцінки екологічних ризиків для населення і природних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження екологічних наслідків військових дій набули особливої актуальності після початку повномасштабної війни в Україні. Сучасні наукові праці свідчать, що військові конфлікти спричиняють комплексний негативний вплив на всі компоненти навколишнього природного середовища, включаючи атмосферне повітря, ґрунти, водні ресурси, біорізноманіття та екосистемні послуги [1–3].

Одним із найбільш ґрунтовних міжнародних досліджень є звіт Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP), у якому наведено результати попередньої оцінки екологічних наслідків війни в Україні. У документі зазначено, що руйнування промислової, транспортної та енергетичної інфраструктури супроводжується масштабним забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів, а екологічні наслідки військових дій можуть зберігатися протягом тривалого часу після завершення бойових дій [4]. Аналогічні висновки наведено у дослідженні Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD), у якому проаналізовано екологічні наслідки руйнування промислової, транспортної та енергетичної інфраструктури, а також наголошено на необхідності інтеграції екологічних принципів у процес повоєнного відновлення України відповідно до концепції «зеленої» відбудови [5].

Комплексний аналіз сучасних наукових публікацій щодо впливу війни на компоненти довкілля представлено у роботі [6]. Автори узагальнили результати

досліджень щодо забруднення атмосферного повітря, деградації ґрунтів, порушення водних екосистем і втрати біорізноманіття, наголошуючи на необхідності застосування інтегрованих методів екологічної оцінки територій, що зазнали воєнного впливу [6].

Питання оцінки екологічної безпеки урбанізованих територій розглянуто у дослідженні [7], у якому показано взаємозв'язок між руйнуванням міської інфраструктури, виникненням екологічних ризиків та необхідністю формування стійких механізмів післявоєнного відновлення міст [7].

Окремий напрям досліджень присвячений оцінці екологічних збитків, завданих довіллю України внаслідок повномасштабної війни. Зокрема, у роботі [8] проаналізовано масштаби забруднення компонентів навколишнього природного середовища, економічні наслідки воєнних дій, а також ризики для здоров'я населення, зумовлені погіршенням стану довкілля.

Важливим джерелом інформації є також міжнародні аналітичні звіти щодо екологічних наслідків війни в Україні, підготовлені за участю експертів Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP), Європейської економічної комісії ООН (UNECE), Conflict and Environment Observatory (CEOBS) та інших міжнародних організацій. У цих документах узагальнено результати оцінки екологічної шкоди, проаналізовано наслідки забруднення територій вибухонебезпечними предметами, деградації лісових екосистем, забруднення поверхневих і підземних вод, а також обґрунтовано необхідність створення сучасної системи екологічного моніторингу та екологічно орієнтованого повоєнного відновлення територій [4].

Незважаючи на значну кількість сучасних досліджень, більшість із них присвячена окремим компонентам довкілля або оцінці загальних екологічних наслідків війни. Водночас питання комплексної оцінки деградації саме урбанізованих екосистем, які характеризуються високою концентрацією населення, промислових об'єктів та інженерної інфраструктури, залишаються недостатньо дослідженими. Недостатньо розробленими є також інтегральні підходи до оцінювання стану міських екосистем після військового впливу, що обумовлює необхідність подальших наукових досліджень у цьому напрямі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених дослідженню екологічних наслідків військових дій, більшість із них зосереджена на оцінці окремих компонентів довкілля, зокрема забруднення атмосферного повітря, ґрунтів, водних ресурсів або втрати біорізноманіття. Значна частина сучасних досліджень також присвячена визначенню масштабів екологічних збитків, завданих військовими діями, та аналізу ризиків для здоров'я населення. Водночас питання комплексної оцінки деградації урбанізованих екосистем під впли-

вом військових дій залишаються недостатньо дослідженими.

Особливої уваги потребує вивчення взаємозв'язків між змінами окремих компонентів міського середовища та їх сукупним впливом на функціонування урбанізованих екосистем. Недостатньо дослідженими залишаються процеси трансформації екологічного стану міських територій внаслідок одночасного впливу руйнування інфраструктури, утворення відходів руйнувань, забруднення небезпечними речовинами та скорочення площ зелених насаджень. Також потребують подальшого наукового обґрунтування підходи до інтегральної оцінки ступеня деградації урбанізованих екосистем, які б дозволяли враховувати сукупний вплив військових дій на атмосферне повітря, ґрунтовий покрив, водні ресурси та біотичні компоненти міського середовища.

Крім того, недостатньо розробленими залишаються підходи до визначення пріоритетних напрямів екологічного відновлення урбанізованих територій, що зазнали воєнного впливу, з урахуванням особливостей їх екологічного стану та рівня антропогенного навантаження. У зв'язку з цим актуальним є проведення комплексного аналізу військових дій як чинника деградації урбанізованих екосистем та визначення основних екологічних наслідків такого впливу, що й обумовлює зміст даного дослідження.

Новизна роботи полягає у комплексному дослідженні військових дій як чинника деградації урбанізованих екосистем та узагальненні основних екологічних наслідків їх впливу на компоненти міського середовища. У роботі систематизовано основні джерела та чинники воєнного впливу на урбанізовані території, що призводять до порушення екологічної рівноваги, погіршення якості атмосферного повітря, забруднення ґрунтів і водних ресурсів, а також зниження рівня біорізноманіття.

Набуло подальшого розвитку наукове обґрунтування взаємозв'язку між руйнуванням міської інфраструктури та процесами деградації урбанізованих екосистем шляхом узагальнення сучасних даних щодо екологічних наслідків військових дій. Визначено основні напрями трансформації компонентів довкілля під впливом воєнних чинників та охарактеризовано їх вплив на екологічну стійкість міських територій.

Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до аналізу впливу військових дій на урбанізовані екосистеми, який передбачає розгляд взаємопов'язаних змін у стані атмосферного повітря, ґрунтів, водних ресурсів, зелених насаджень та біотичних компонентів міського середовища.

Виклад основного матеріалу. Урбанізовані екосистеми є складними природно-антропогенними системами, розвиток і функціонування яких визначаються взаємодією природних компонентів довкілля, інженерної інфраструктури та господарської діяль-

ності людини. Висока концентрація населення, промислових підприємств, транспортної мережі та об'єктів життєзабезпечення зумовлює їх підвищену вразливість до зовнішніх впливів. Одним із найбільш масштабних антропогенних чинників трансформації міського середовища є військові дії, які супроводжуються руйнуванням об'єктів інфраструктури, виникненням пожеж, утворенням значних обсягів відходів руйнування, забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів, а також порушенням екологічної рівноваги урбанізованих територій [9].

Наслідки військових дій мають комплексний характер і охоплюють усі компоненти урбанізованих екосистем. Вибухи боєприпасів, артилерійські обстріли, пожежі та руйнування промислових підприємств призводять до надходження у навколишнє природне середовище твердих частинок (РМ), оксидів азоту (NO_x), оксиду вуглецю (СО), діоксиду сірки (SO_2), поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), важких металів та інших токсичних сполук, що становлять загрозу для екосистем і здоров'я населення [10].

Значний негативний вплив також пов'язаний із пошкодженням складів паливно-мастильних матеріалів, систем водопостачання та водовідведення, що спричиняє вторинне забруднення ґрунтів і водних об'єктів [8]. Руйнування зелених насаджень, міських парків і природних територій призводить до зниження біорізноманіття, втрати екосистемних послуг та погіршення санітарно-гігієнічного стану міського середовища [11].

Для систематизації процесів деградації урбанізованих екосистем, визначення взаємозв'язків між основними чинниками військового впливу, компонентами довкілля та напрямками їх відновлення запропоновано концептуальну схему, наведену на рис. 1.

Як показано на рис. 1, військові дії є першопричиною комплексу взаємопов'язаних деградаційних процесів, що охоплюють атмосферне повітря, ґрунтовий покрив, поверхневі й підземні води, біоту, зелені насадження та урбанізовану інфраструктуру. Оцінка екологічного стану територій повинна здійснюватися на основі інтегрованої системи моніторингу, яка включає фізичні, хімічні, біологічні та просторові методи дослідження. Комплексний аналіз отриманих результатів дає можливість визначити рівень деградації урбанізованих екосистем, оцінити екологічні ризики та обґрунтувати пріоритетні природоохоронні й відновлювальні заходи.

Основні наслідки військових дій для компонентів урбанізованих екосистем узагальнено на рисунку 2.

Аналіз даних, наведених на рисунку 2, свідчить, що найбільш уразливими компонентами міського середовища є атмосферне повітря, ґрунти та водні ресурси. Водночас деградація окремих компонентів не є ізольованим процесом, а супроводжується каскадними змінами в межах усієї урбанізованої екосистеми. Забруднення атмосферного повітря

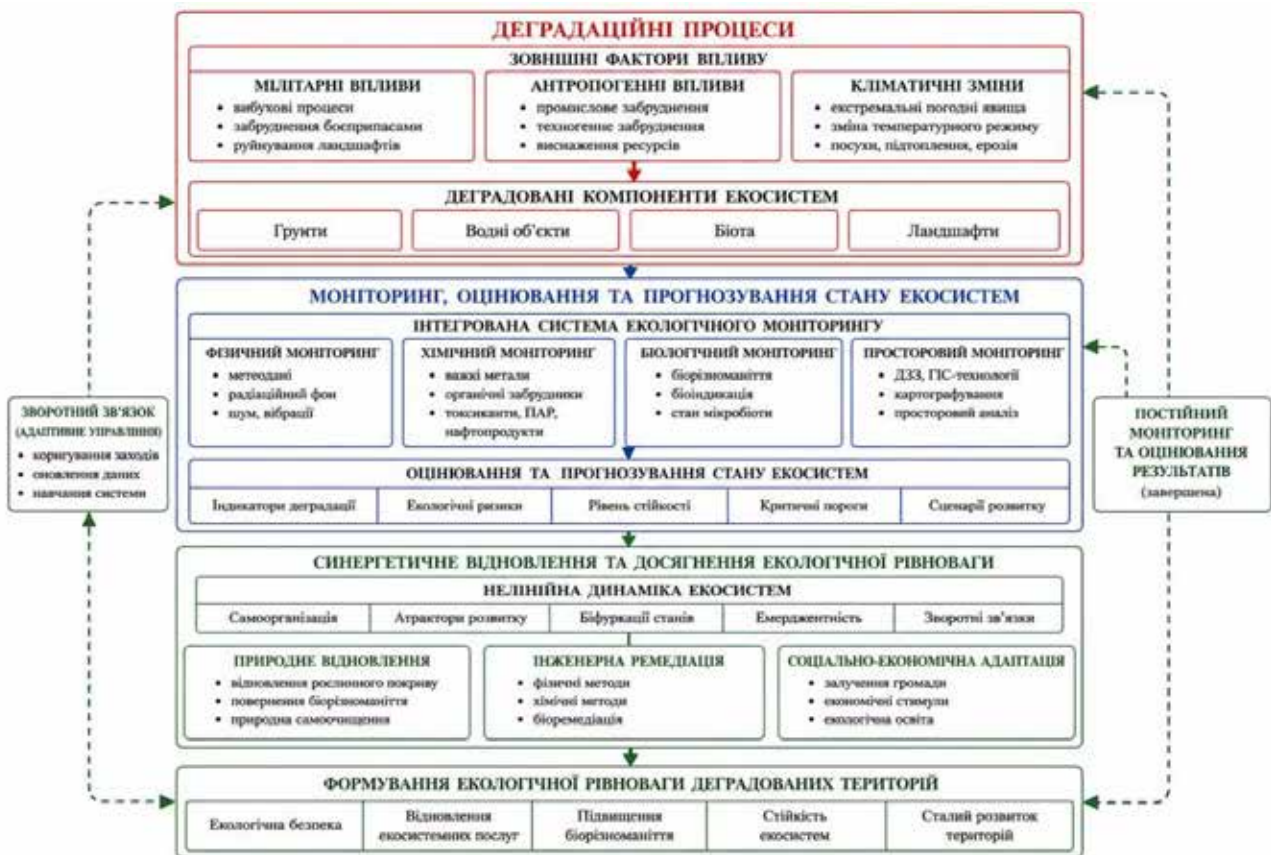


Рис. 1. Концептуальна схема деградації урбанізованих екосистем під впливом військових дій, їх моніторингу, оцінювання та відновлення

сприяє вторинному накопиченню токсичних речовин у ґрунтах і водних об'єктах, деградація рослинного покриву знижує природну здатність територій до самоочищення, а руйнування інженерної інфраструктури ускладнює функціонування систем екологічного захисту. Такий взаємозв'язок підтверджує необхідність застосування комплексного підходу до оцінювання екологічного стану територій, які зазнали воєнного впливу.

Таким чином, військові дії виступають одним із найвагоміших чинників деградації урбанізованих екосистем, наслідки якого мають системний і довготривалий характер. Ефективне управління такими територіями повинно базуватися на інтегрованому екологічному моніторингу, комплексній оцінці стану компонентів довкілля та реалізації науково обґрунтованих заходів щодо їх відновлення. Застосування запропонованого підходу сприятиме підвищенню ефективності екологічного управління в процесі повоєнної відбудови міст та забезпеченню їх екологічної стійкості.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що військові дії є одним із найвагоміших антропогенних чинників деградації урбанізованих екосистем, вплив яких має комплексний характер і охоплює всі компоненти навколишнього природного середовища. Руйнування об'єктів

житлової, промислової, транспортної та енергетичної інфраструктури супроводжується забрудненням атмосферного повітря, ґрунтів і водних ресурсів, скороченням площ зелених насаджень та порушенням екологічної рівноваги міських територій.

Узагальнення сучасних наукових досліджень дозволило визначити основні чинники деградації урбанізованих екосистем унаслідок військових дій та встановити взаємозв'язок між руйнуванням інфраструктури, трансформацією компонентів довкілля й формуванням довготривалих екологічних ризиків. Показано, що негативні наслідки військового впливу мають кумулятивний характер і можуть зберігатися протягом тривалого часу після завершення бойових дій.

Запропонована концептуальна схема комплексної оцінки деградації урбанізованих екосистем відображає взаємозв'язок між основними чинниками військового впливу, компонентами довкілля, системою екологічного моніторингу та природоохоронними заходами. Її використання сприяє систематизації процесу оцінювання екологічного стану територій і визначенню пріоритетних напрямів їх відновлення.

Встановлено, що забезпечення екологічної безпеки урбанізованих територій потребує впровадження інтегрованої системи моніторингу, яка поєд-

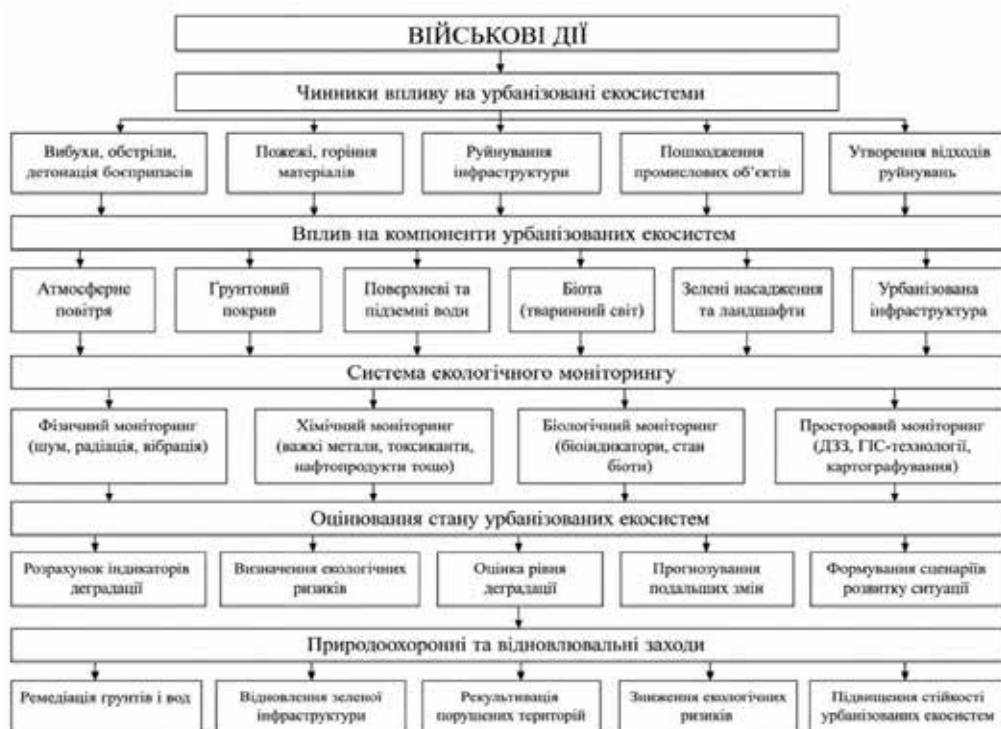


Рис. 2. Основні наслідки військових дій для компонентів урбанізованих екосистем

нує фізичні, хімічні, біологічні та просторові методи дослідження. Комплексний аналіз отриманих даних є необхідною передумовою для оцінки ступеня

деградації екосистем, прогнозування можливих екологічних ризиків та розроблення ефективних заходів з відновлення порушених територій.

Література

1. Leal Filho W., Eustachio J. H. P. P., Fedoruk M., Lisovska T. War in Ukraine: an overview of environmental impacts and consequences for human health. *Frontiers in Sustainable Resource Management*. 2024. Vol. 3. Article 1423444. DOI: 10.3389/fsrma.2024.1423444.
2. Elbakidze M., Kuns B., Gunko R., Kruhlov I. et al. Understanding the impact of the war on people–nature relationships in Ukraine. *Ecosystem Services*. 2025. Vol. 73. Article 101725. DOI: 10.1016/j.ecoser.2025.101725.
3. Leal Filho W., Fedoruk M., Eustachio J. H. P. P., Splodytel A. et al. The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. Article 121399. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121399.
4. United Nations Environment Programme. *The Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review*. Nairobi, 2022. URL: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine-preliminary-review>.
5. OECD. *Environmental Impacts of the War in Ukraine and Prospects for a Green Reconstruction*. OECD Policy Responses on the Impacts of the War in Ukraine. Paris, 2022. DOI: 10.1787/9e86d691-en.
6. Lelechenko N., Derun T. Impact of the armed conflict on environmental safety and resilience of the urban environment in Ukraine. *Aestim*. 2025. No. 86. P. 61–72. DOI: 10.36253/aestim-16857.
7. Hryhorczuk D., Levy B. S., Prodanchuk M., Kravchuk O., et al. The environmental health impacts of Russia's war on Ukraine. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*. 2024. Vol. 19. Article 1. DOI: 10.1186/s12995-023-00398-y.
8. Hartmane I., Biyashev B., Getman A., Yaroshenko O., et al. Impacts of war on Ukrainian nature. *International Journal of Environmental Studies*. 2024. Vol. 81. No. 1. P. 455–462. DOI: 10.1080/00207233.2024.2314856.
9. Solokha M., Demyanyuk O., Symochko L., Mazur S., et al. Soil Degradation and Contamination Due to Armed Conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13. No. 10. Article 1614. DOI: 10.3390/land13101614.
10. Goyanna F.A. de Alencar, Bezerra M. F., Silva G. B. da, Rezende C. E., et al. Ecological drivers of mercury accumulation in oceanic apex predators: A human consumption advisory. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 970. Article 178994. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178994.
11. Bilyi T., Hlavatskyi D., Poliachenko I., Melnyk G., et al. The degree of soil degradation and aerosol formation from explosion products resulting from hostilities in Ukraine. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2025. Vol. 108. No. 1. P. 39–46. DOI: 10.17721/1728-2713.108.05.

Дата першого надходження статті до видання: 09.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЕКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЗРІЛІСТЬ ТРАНСПОРТНИХ ПІДПРИЄМСТВ ЯК НОВА НАУКОВА КАТЕГОРІЯ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ

Вознюк Я.Ю.

Національний транспортний університет
вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ
yavzn@gmail.com

Транспортна галузь є одним із найбільших джерел антропогенного навантаження на довкілля: дорожній транспорт формує понад дві третини викидів парникових газів транспортного сектору ЄС, а в українських містах його частка у загальному обсязі викидів забруднюючих речовин сягає 90 %. Специфічною рисою вітчизняної ситуації є критична зношеність рухомого складу – середній вік автомобілів в Україні перевищує 23 роки, що означає переважання стандартів Euro 0-2 з відсутніми або несправними системами нейтралізації відпрацьованих газів. В умовах євроінтеграції та впровадження стандарту Євро-7 ця технологічна відсталість набуває характеру структурної галузевої проблеми, що вимагає нових інструментів діагностики та управління. У статті встановлено, що існуючі методичні підходи до оцінки екологічної ефективності підприємств – нормативно-порівняльний, на основі ISO 14031, індексні методи, оцінка життєвого циклу (LCA) та багатокритеріальний аналіз (MCDA) – мають спільну методологічну ваду: всі вони вимірюють досягнутий екологічний результат, але не здатні охарактеризувати технологічний потенціал підприємства як структурну основу цього результату. Для подолання виявленої прогалини запропоновано нову наукову категорію – еко-технологічна зрілість транспортного підприємства (ЕТЗ), що визначається як комплексна характеристика стану виробничо-технологічної системи підприємства, яка визначає її спроможність стабільно мінімізувати антропогенний вплив на довкілля через інтеграцію найкращих доступних природоохоронних технологій та систем їх контролю. Розкрито зміст трьох структурних компонентів ЕТЗ: технологічного потенціалу, технологічної результативності та системності технологічного захисту. Показано, що нова категорія дозволяє розрізняти підприємства з однаковим рівнем фактичних викидів, але принципово різним технологічним потенціалом, і формує концептуальну основу для подальшого розроблення кількісного методу оцінки ЕТЗ. *Ключові слова:* еко-технологічна зрілість, транспортне підприємство, екологічна ефективність, природоохоронні технології, сталий розвиток.

Eco-technological maturity of transport enterprises as a new scientific category of environmental management. Vozniuk Ya.

The transport industry is one of the largest sources of anthropogenic environmental pressure: road transport accounts for over two-thirds of greenhouse gas emissions from the EU transport sector, while in Ukrainian cities its share of total pollutant emissions reaches 90 %. A distinctive feature of the domestic situation is the critical ageing of the vehicle fleet – the average age of vehicles in Ukraine exceeds 23 years, implying the dominance of Euro 0–2 standards with absent or non-functioning exhaust after-treatment systems. In the context of European integration and the introduction of the Euro 7 standard, this technological backwardness is becoming a structural industry problem requiring new diagnostic and management tools. The article establishes that existing methodological approaches to assessing the environmental performance of enterprises – normative-comparative, ISO 14031-based, index methods, life cycle assessment (LCA) and multi-criteria analysis (MCDA) – share a common methodological flaw: all of them measure the achieved environmental outcome but are unable to characterise the technological potential of an enterprise as the structural basis of that outcome. To bridge the identified gap, a new scientific category is proposed – eco-technological maturity of a transport enterprise (ETM), defined as a comprehensive characteristic of the state of the production and technological system of an enterprise that determines its ability to consistently minimise anthropogenic environmental impact through the integration of best available environmental protection technologies and their control systems. The content of three structural components of ETM is disclosed: technological potential, technological effectiveness, and systematic coverage of environmental protection. It is shown that the new category makes it possible to distinguish between enterprises with the same level of actual emissions but fundamentally different technological potential, and provides a conceptual basis for the further development of a quantitative ETM assessment method. *Key words:* eco-technological maturity, transport enterprise, environmental efficiency, environmental protection technologies, sustainable development.

Постановка проблеми. Транспортний сектор посідає особливе місце серед галузей економіки за масштабами екологічного впливу. За оцінками Європейського екологічного агентства, він формує

31 % сукупних викидів парникових газів у країнах ЄС-27, і на відміну від більшості інших секторів – де спостерігається скорочення викидів – транспортні викиди за три десятиліття зросли на чверть [1].



Серед видів транспорту домінує дорожній: понад дві третини транспортних викидів парникових газів у ЄС припадає саме на нього. Для України ці тенденції мають ще більш виражений характер. Пересувні джерела забруднення – переважно автомобільний транспорт – є головними постачальниками оксиду вуглецю, оксидів азоту та летких органічних сполук в атмосферне повітря [3]. У великих містах, зокрема в Києві, внесок автотранспорту у загальний обсяг викидів забруднюючих речовин сягає 90 % [5]. Водночас специфічною рисою вітчизняної ситуації є критична зношеність транспортного парку: середній вік автомобілів в Україні перевищує 23 роки – вдвічі більше, ніж у країнах ЄС [1]. Переважна частина рухомого складу функціонує без сучасних систем нейтралізації відпрацьованих газів або з такими, що давно вийшли з ладу. Підприємство, яке демонструє задовільні показники завдяки низькій інтенсивності перевезень, і підприємство, яке досягає тих самих показників завдяки сучасним природоохоронним технологіям, отримують ідентичну оцінку – хоча їхній реальний екологічний потенціал кардинально різний. Подолання цього протиріччя вимагає нових концептуальних інструментів.

Актуальність дослідження. Запит на нові підходи до оцінки екологічного стану транспортних підприємств став особливо гострим в умовах повномасштабного збройного вторгнення. Пошкодження виробничої інфраструктури, вимушена релокація підприємств та суттєве скорочення державного екологічного нагляду утворили ситуацію, в якій традиційні методи оцінювання виявилися малоприматними. Паралельно загострилися довоєнні системні проблеми: низький рівень впровадження сертифікованих систем екологічного менеджменту в галузі та відсутність галузевих нормативів питомих екологічних показників позбавляють підприємства орієнтирів для самостійної оцінки. Нові стандарти Євро-7, прийняті Регламентом ЄС 2024/1257 [6], розширюють перелік нормованих забруднювачів і вводять систему бортового моніторингу викидів у реальних умовах – тобто фактично переходять від контролю результату до контролю технологічного процесу. Розвиток інтелектуалізованих транспортних систем також відкриває нові можливості для підвищення екологічності перевезень [2]. Це свідчить про те, що регуляторна логіка рухається у напрямі, який концепція ЕТЗ покликана методично оформити.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконується в руслі реалізації Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року [7] та відповідає завданням адаптації вітчизняного екологічного законодавства до стандартів ЄС. Практична цінність запропонованої категорії полягає у можливості її застосування при формуванні програм екологічної модернізації транспортних підприємств та вдосконаленні норма-

тивно-методичного забезпечення галузевого екологічного менеджменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Концептуальні засади оцінки екологічної ефективності підприємств закладено у доповіді WBCSD «Changing Course» (1992), де еко-ефективність визначено як досягнення конкурентоспроможних результатів при послідовному зменшенні екологічного навантаження. У прикладному вимірі найбільш системним інструментом залишається стандарт ISO 14031:2021, що структурує оцінку через показники операційної ефективності (OPI) та ефективності управління (MPI) [8]. Zhu Z. та співавтори (2023) дослідили еко-ефективність транспортної галузі Китаю з використанням DEA-аналізу [9]. Zhou G. та Zhang Z. (2024) розвинули трьохстадійний DEA-підхід для оцінки регіональної екологічної ефективності [10]. Gökgöz E. (2025) дослідив зв'язок між енергетичною та економічною ефективністю транспортного сектору ЄС [11]. Kwilinski A. та співавтори (2024) систематизували технологічні підходи до скорочення транспортних викидів CO₂ [12]. Júnior H. D. S. Q. та співавтори (2024) застосували DEA для порівняльної оцінки транспортних систем Південної Америки [13]. Dabbagh R. та Parvizi Omran N. (2024) здійснили систематичний огляд застосувань АНР у транспортних дослідженнях [14]. Cámara-Aceituno J. та співавтори (2023) оцінили екологічну ефективність 27 країн ЄС методом DEA [16]. Burchart D. та Przytuła I. (2024) систематизували методи оцінки сталого розвитку транспортного сектору з урахуванням концепції життєвого циклу [17]. Попри методологічне різноманіття цих підходів, усі вони об'єднані спільною логікою: оцінюється те, що підприємство вже зробило з точки зору екологічного впливу, а питання про технологічний потенціал залишається поза межами аналізу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Порівняльний аналіз п'яти методичних підходів до оцінки екологічної ефективності підприємств виявляє їх структурне обмеження: жоден з них не розглядає технологічну систему захисту довкілля як самостійний об'єкт оцінювання (табл. 1).

Наведена систематизація засвідчує: жоден з підходів не дає відповіді на запитання про те, яким технологічним потенціалом підприємство розташовує для стабільного забезпечення прийнятного рівня екологічного впливу. Саме ця прогалина і є предметом справжньої статті.

Новизна. У роботі вперше запроваджено поняття еко-технологічної зрілості транспортного підприємства (ЕТЗ) як наукової категорії екологічного менеджменту. На відміну від поняття «екологічна ефективність», що характеризує результат діяльності в певний момент часу, ЕТЗ відображає структурні властивості виробничо-технологічної системи підприємства – її потенціал до стабільного екологічно

Таблиця 1

**Порівняльна характеристика методичних підходів
до оцінки екологічної ефективності транспортних підприємств**

Підхід	Що оцінює	Сильні сторони	Ключове обмеження
Нормативно-порівняльний	Відповідність фактичних показників нормативам ГДВ, ГДС	Чіткість критерію; сумісність з обов'язковою звітністю	Не розрізняє технологічно розвинені та технологічно відсталі підприємства з однаковим рівнем викидів
ISO 14031:2021	Динаміку операційних та управлінських показників	Системність; орієнтація на поліпшення	Застосовний лише за наявності СЕМ; відсутній єдиний інтегральний критерій
Індексні методи (PSR, ESI)	Агрегований індекс з нормованих показників	Придатний для рейтингування та ESG-звітності	Компенсаційний ефект: низькі показники за одними критеріями перекриваються високими за іншими
Оцінка життєвого циклу (LCA)	Сукупний екологічний вплив на всіх стадіях ЖЦ послуги	Найбільш повний охват впливів [17, 18]	Висока ресурсоемність; непридатний для оперативного управлінського використання
Багатокритеріальний аналіз (AHP, TOPSIS, DEA)	Відносну ефективність підприємств за множиною критеріїв [14, 15, 16]	Математична строгість; можливість міжпідприємницького порівняння	Відсутній галузевий адаптований перелік критеріїв для ТП; результат чутливий до вагових коефіцієнтів

Джерело: складено автором на основі [8–18].

відповідального функціонування незалежно від кон'юнктурних факторів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонована категорія заповнює концептуальну нішу між поняттями «екологічна ефективність» (результат) та «найкраща доступна технологія» (нормативний орієнтир). ЕТЗ характеризує реальний технологічний стан конкретного підприємства – відстань між наявним станом та орієнтиром. Концептуально це близько до поняття Technology Readiness Level (TRL), що використовується в авіаційній та оборонній промисловості, – з тією відмінністю, що ЕТЗ характеризує не окрему технологію, а виробничо-технологічну систему підприємства в цілому. Загальнонаукове значення полягає у розширенні понятійного апарату екологічного менеджменту транспортних підприємств та формуванні методологічної основи для подальших порівняльних досліджень у галузі.

Виклад основного матеріалу. Аналіз структури екологічного впливу підприємств транспортної галузі дозволяє виокремити п'ять ключових напрямів: забруднення атмосферного повітря відпрацьованими газами та викидами стаціонарних джерел; шумовий вплив на прилеглі території; забруднення поверхневих вод і ґрунтів нафтопродуктами та технічними рідинами; утворення відходів різних класів небезпеки. Для кожного з цих напрямів існує ідентифікований технологічний дефіцит – конкретна відсутня або несправна система захисту, що безпосередньо зумовлює екологічне навантаження. Системи нейтралізації відпрацьованих газів – трикомпонентний каталітичний нейтралізатор (TWC),

сажовий фільтр (DPF), система селективної каталітичної нейтралізації (SCR) – здатні знижувати викиди основних забруднювачів на 30–99 % [4]. Дослідження реальних викидів сучасних дизельних вантажівок у різних режимах роботи підтверджують критичну роль технічного стану систем доочищення [20]. Цифрові інструменти управління парком забезпечують додаткове зниження питомих викидів та підвищення загального рівня екологічності перевезень [2, 21]. Проте між наявністю ефективних технологій і їх реальним впровадженням на вітчизняних підприємствах існує значний розрив: більшість з них експлуатує рухомий склад стандартів Euro 0–2, очисні споруди перебувають у незадовільному стані, управління небезпечними відходами здійснюється із порушеннями вимог. Жоден з наявних методичних підходів не дозволяє отримати інтегральну характеристику цього технологічного стану.

Для заповнення цієї методологічної ніші запропоновано нову категорію. **Еколого-технологічна зрілість транспортного підприємства (ЕТЗ)** – це комплексна характеристика стану виробничо-технологічної системи підприємства, що визначає її спроможність стабільно мінімізувати антропогенний вплив на довкілля через інтеграцію найкращих доступних природоохоронних технологій та систем їх контролю. Важливим є слово «стабільно»: підприємство з високою ЕТЗ здатне підтримувати низький рівень екологічного впливу навіть при зростанні обсягів перевезень або послабленні зовнішнього контролю – не тому, що за ним стежать, а тому що воно має відповідну технологічну базу.

У структурному відношенні ЕТЗ складається з трьох компонентів. *Технологічний потенціал* характеризує наявність і рівень природоохоронних технологій: відповідність рухомого складу екологічним стандартам, справність систем нейтралізації відпрацьованих газів, стан очисних споруд, наявність шумозахисних рішень, організацію поводження з небезпечними відходами. *Технологічна результативність* показує, якою мірою наявні технології реально забезпечують відповідність нормативним вимогам за всіма напрямками екологічного впливу – саме цей компонент поглинає логіку нормативно-порівняльного підходу. *Системність технологічного захисту* відображає повноту охоплення різних видів екологічного впливу та рівень автоматизації контролю: підприємство з сучасними системами нейтралізації газів, але без очисних споруд матиме низьке значення за цим компонентом незалежно від рівня першого. Застосування методів DEA та АНР [15, 16, 19] дозволить у подальших дослідженнях формалізувати кількісну оцінку кожного з трьох компонентів ЕТЗ.

Головні висновки. 1. Транспортна галузь формує 31 % викидів парникових газів у ЄС і є головним джерелом забруднення атмосферного повітря в українських містах. Критична зношеність вітчизняного

рухомого складу перетворює технологічну відсталість підприємств на структурну проблему галузі.

2. П'ять методичних підходів до оцінки екологічної ефективності підприємств – нормативно-порівняльний, ISO 14031, індексні методи, LCA та MCDA – мають спільне обмеження: усі оцінюють досягнутий результат, не торкаючись питання про технологічний потенціал підприємства.

3. Запропоновано нову наукову категорію – еколого-технологічна зрілість транспортного підприємства (ЕТЗ), що характеризує спроможність виробничо-технологічної системи підприємства стабільно мінімізувати антропогенний вплив на довкілля.

4. Структура ЕТЗ включає три компоненти – технологічний потенціал, технологічну результативність та системність технологічного захисту, – що дозволяє охопити різні аспекти природоохоронної діяльності в єдиній концептуальній рамці.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонована категорія ЕТЗ може слугувати концептуальною основою для розроблення галузевих програм екологічної модернізації транспортних підприємств, вдосконалення нормативно-методичного забезпечення екологічного менеджменту та формування системи критеріїв для міжпідприємницького порівняння рівня технологічного захисту довкілля в умовах євроінтеграції.

Література

1. European Environment Agency. Greenhouse gas emissions from transport. Published 10 February 2026. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/greenhouse-gas-emissions-from-transport> (дата звернення: 01.05.2025).
2. Ladyzhenskyi E., Petlenko V., Hryni A. Increasing the Level of Environmental Friendliness of Transportation Based on the Intellectualization of Transport Systems. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. 2025. Vol. 2, No. 11(42). P. 286-297. DOI: 10.32515/2664-262x.2025.11(42).2.286-297.
3. Державна служба статистики України. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря в Україні (1990-2024). URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/ns.htm (дата звернення: 01.05.2025).
4. Zhang Y., Du J., Shan Y., Wang F., Liu J., Wang M., Liu Z., Yan Y., Xu G., He G., Shi X., Lian Z., Yu Y., Shan W., He H. Toward synergetic reduction of pollutant and greenhouse gas emissions from vehicles: a catalysis perspective. *Chemical Society Reviews*. 2025. DOI: 10.1039/d4cs00140k.
5. Хацей А., Трус І. Динаміка викидів забруднюючих речовин в Україні та м. Києві у атмосферне повітря від стаціонарних та пересувних джерел забруднення. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. № 351(3.1). С. 557-564. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-351-72.
6. Regulation (EU) 2024/1257 of the European Parliament and of the Council of 24 April 2024 on type-approval of motor vehicles and engines with respect to their emissions and battery durability (Euro 7). OJ L, 2024/1257, 8.5.2024.
7. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550.
8. ISO 14031:2021. Environmental management – Environmental performance evaluation – Guidelines. Geneva: ISO, 2021. 32 p.
9. Zhu Z., Zhang X., Xue M., Song Y. Eco-Efficiency and Its Evolutionary Change under Regulatory Constraints: A Case Study of Chinese Transportation Industry. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, No. 9. Art. 7456. DOI: 10.3390/su15097456.
10. Zhou G., Zhang Z. Evaluation and Influencing Factors of Regional Environmental Efficiency in China Based on Three-Stage DEA Model. *SAGE Open*. 2024. Vol. 14, No. 3. DOI: 10.1177/21582440241280825.
11. Gökgöz F., Yalçın E. Dynamics of energy and economic transportation efficiency: An analysis of EU transportation sector. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2025. Vol. 44, No. 6. Art. e70026. DOI: 10.1002/ep.70026.
12. Kwilinski A., Lyulyov O., Pimonenko T. Reducing Transport Sector CO₂ Emissions Patterns: Environmental Technologies and Renewable Energy. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2024. Vol. 10, No. 1. Art. 100217. DOI: 10.1016/j.joitmc.2024.100217.
13. Júnior H. D. S. Q., Celestino M. A., Falcão V. A., Silva F. G. F., Andrade M. O., Brasileiro A. Evaluating Sustainable Efficiency: A Study on Transportation Systems in South America Using Data Envelopment Analysis. *Latin American Transport Studies*. 2024. Vol. 2. Art. 100012. DOI: 10.1016/j.latran.2024.100012.

14. Kriswardhana W., Toaza B., Esztergár-Kiss D., Duleba S. Analytic hierarchy process in transportation decision-making: A two-staged review on the themes and trends of two decades. *Expert Systems with Applications*. 2025. Vol. 261. P. 125491. DOI: 10.1016/j.eswa.2024.125491.
15. Janicka M., Sajnog A. Environmental Efficiency and Market Value: Using the Data Envelopment Analysis Method to Evaluate Public Companies From the European Union. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*. 2025. P. 1–21. DOI: 10.1002/csr.70335.
16. Cámara-Aceituno J., Hermoso-Orzáez M. J., Terrados-Cepeda J., Mena-Nieto Á., García-Ramos J. E. Application of the data envelopment analysis technique to measure the environmental efficiency of the 27 countries of the European Union during the period 2012–2020. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2024. Vol. 26, No. 5. P. 1477–1505. DOI: 10.1007/s10098-023-02553-9.
17. Burchart D., Przytuła I. Sustainability Assessment Methods for the Transport Sector Considering the Life Cycle Concept – A Review. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, No. 18. Art. 8148. DOI: 10.3390/su16188148.
18. Osorio-Tejada J. L., Llera-Sastresa E., Scarpellini S. Environmental assessment of road freight transport services beyond the tank-to-wheels analysis based on LCA. *Environment, Development and Sustainability*. 2024. Vol. 26, No. 1. P. 421–451. DOI: 10.1007/s10668-022-02715-7.
19. Ghandehari M., Kamali Yazdi F., Habibi S. Data Envelopment Analysis: A Novel Approach for Assessing the Efficiency of Air Pollution Mitigation Strategies in Metropolitan Areas. *Transactions on Soft Computing*. 2025. Vol. 1, No. 1. DOI: 10.48314/tsc.vi.39.
20. Ma T., Toumasatos Z., Tang T., Durbin T. D., Johnson K. C., Karavalakis G. Real-World Particle Emissions from a Modern Heavy-Duty Diesel Vehicle during Normal Operation and DPF Regeneration Events. *Environmental Science & Technology*. 2025. DOI: 10.1021/acs.est.4c12448.
21. Xiao C. Sustainable logistics development strategy based on SWOT and analytic hierarchy process. *PLOS ONE*. 2024. Vol. 19, No. 10. Art. e0312560. DOI: 10.1371/journal.pone.0312560.

Дата першого надходження статті до видання: 03.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

МОДЕЛЮВАННЯ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЗАБРУДНЕННЯМ ҐРУНТУ ТА НАКОПИЧЕННЯМ ^{137}Cs ДИКОРΟΣЛИМИ ГРИБАМИ НА ТЕРИТОРІЇ ПОЛІССЯ

Дмитрук Д.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

filinfilin73@gmail.com

У статті досліджено взаємозв'язок між щільністю забруднення ґрунту радіонуклідом ^{137}Cs та рівнем його накопичення у плодових тілах дикорослих грибів на території Українського Полісся. Аварія на Чорнобильській атомній електростанції 1986 року спричинила масштабне радіоактивне забруднення лісових екосистем регіону, наслідки якого відчутні до сьогодні, оскільки ^{137}Cs із періодом напіврозпаду близько 30 років залишається біологічно доступним у лісовій підстилці та верхніх горизонтах мінерального ґрунту. Польові дослідження проводили у Коростенському та Овруцькому районах Житомирської області впродовж 2022–2024 років на 24 постійних пробних площах у трьох типах лісорослинних умов. Питому активність радіонукліда визначали гамма-спектрометричним методом з одночасним відбором зразків грибів та ґрунту за горизонтами. Встановлено, що гриби-симбіотрофи характеризуються достовірно вищими значеннями питомої активності ^{137}Cs порівняно з ксилотрофними та сапротрофними видами. На основі аналізу багаторічних моніторингових даних побудовано регресійні моделі залежності питомої активності ^{137}Cs у плодових тілах грибів від щільності забруднення ґрунту, причому для симбіотрофів кращу відповідність забезпечила степенева модель, а для сапротрофів – лінійна. Показано, що агрегований коефіцієнт переходу радіонукліда суттєво варіює між видами та типами лісорослинних умов і достовірно модифікується агрохімічними параметрами ґрунту, насамперед рН та вмістом обмінного калію. Використання сфагнових боліт як окремого моделювального об'єкта дозволило виявити відмінну динаміку міграції цезію порівняно з піщаними підзолистими ґрунтами. Запропонована математична модель забезпечує прийнятну точність прогнозування накопичення ^{137}Cs у грибах за умови відомої щільності забруднення ґрунту та врахування видової й екотипичної специфіки грибів. Отримані результати мають практичне значення для радіоекологічного моніторингу, оцінювання дозового навантаження на населення від споживання лісових грибів та розробки ґрунтованих нормативних рекомендацій щодо зонування доступу до їх збору. *Ключові слова:* Cs, радіоактивне забруднення ґрунту, дикорослі гриби, Полісся, коефіцієнт переходу, регресійна модель, радіоекологічний моніторинг.

Modelling the relationship between soil contamination and ^{137}Cs accumulation in wild mushrooms on the territory of Polissia.
Dmytruk D.

The article investigates the relationship between ^{137}Cs soil contamination density and the accumulation of this radionuclide in fruiting bodies of wild mushrooms in the Ukrainian Polissia region. The Chernobyl Nuclear Power Plant accident of 1986 caused large-scale radioactive contamination of the region's forest ecosystems, the consequences of which remain significant to this day, since ^{137}Cs with a half-life of about 30 years remains biologically available in the forest litter and upper horizons of the mineral soil. Field studies were carried out in the Korosten and Ovruch districts of Zhytomyr region during 2022–2024 on 24 permanent sample plots across three forest site types. Specific activity was determined by gamma-spectrometry with simultaneous sampling of mushrooms and soil by horizons. It has been established that ectomycorrhizal (symbiotroph) mushroom species are characterised by significantly higher ^{137}Cs specific activity compared to xylophilic and saprotrophic species. Based on the analysis of long-term monitoring data, regression models of the dependence of ^{137}Cs specific activity in mushroom fruiting bodies on soil contamination density have been constructed, with a power model providing better adequacy for symbiotrophs and a linear one for saprotrophs. It is shown that the aggregated radionuclide transfer factor varies significantly between species and forest site types and is significantly modified by the agrochemical parameters of the soil, primarily pH and exchangeable potassium content. The use of sphagnum bogs as a separate modelling object made it possible to identify distinct caesium migration dynamics compared to sandy podzolic soils. The proposed mathematical model provides acceptable prediction accuracy for ^{137}Cs accumulation in mushrooms, given knowledge of soil contamination density and consideration of species-specific and ecotypic characteristics. The results obtained are of practical importance for radioecological monitoring, assessment of population radiation exposure from wild forest product consumption, and the development of science-based normative recommendations for zoning access to mushroom picking. *Key words:* Cs, radioactive soil contamination, wild mushrooms, Polissia, transfer factor, regression model, radioecological monitoring.



Постановка проблеми. Лісові екосистеми Полісся України впродовж майже 4 десятиліть залишаються зоною підвищеного радіоекологічного ризику внаслідок катастрофи на Чорнобильській АЕС. Попри фізичний розпад частини початкового радіонуклідного забруднення, ^{137}Cs зі своїм фізичним піврозпадом близько 30 років продовжує акумулюватися у лісовій підстилці та верхніх горизонтах мінерального ґрунту, де залишається біологічно доступним для грибного міцелію. Саме ця обставина робить дикорослі гриби одним із найважливіших шляхів надходження радіоцезію до організму людини через харчовий ланцюг, що становить безпосередній ризик для жителів поліських сіл і міст, які традиційно збирають і споживають їх.

Проблема загострюється тим, що щільність ґрунтового забруднення ^{137}Cs на Поліссі відзначається значною просторовою неоднорідністю: поряд із відносно «чистими» ділянками існують локальні плями з активністю понад $3700 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$. За таких умов прості картографічні підходи до оцінювання радіаційної безпеки збору грибів виявляються недостатніми. Необхідні кількісні прогностичні моделі, які б дозволяли оцінювати вміст ^{137}Cs у плодових тілах грибів безпосередньо на основі параметрів ґрунтового забруднення. Розробка та верифікація таких моделей для конкретних видів грибів і типів лісорослинних умов Полісся є актуальним науково-практичним завданням.

Актуальність дослідження. Понад 38 років після Чорнобильської катастрофи забруднення ^{137}Cs дикорослих грибів на Поліссі України залишається на рівнях, що у багатьох випадках перевищують допустимі значення. Дослідження, проведені у Коростенському районі Житомирської області в 2022 році, зафіксували питому активність ^{137}Cs у деяких видах грибів-симбіотрофів на рівні до $2680 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сухої маси для *Imleria badia* та до $1420 \text{ кБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ для *Tricholoma equestre* [1]. Ці значення принципово перевищують чинний норматив безпеки для грибів в Україні і засвідчують, що радіаційна проблема для лісових екосистем регіону не втратила своєї гостроти.

Разом з тим науково обґрунтованих кількісних моделей, що описують функціональний зв'язок між забрудненням ґрунту та вмістом ^{137}Cs у плодових тілах різних видів грибів стосовно умов Полісся, залишається недостатньо. Існуючі моделі або мають загальний характер і не враховують специфіки поліських ґрунтів, або ґрунтуються на застарілих вимірах раннього постчорнобильського періоду. Нові моніторингові дані, що з'явилися впродовж 2021–2026 років, відкривають можливості для побудови актуалізованих прогностичних залежностей.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проведене дослідження відповідає завданням державного моніторингу навколишнього природного середовища, а також науковій темі кафебри екології, лісівництва

та сталого природокористування, щодо оцінювання радіоекологічного стану лісових екосистем Полісся. Результати пов'язані з практичною потребою оновлення радіаційно-гігієнічних рекомендацій для населення поліського регіону щодо безпеки споживання дикорослих грибів і ягід. Моделі, що розробляються, можуть бути використані у роботі регіональних санітарно-епідеміологічних служб, лісогосподарських підприємств, а також природно-заповідних установ при проведенні оцінки радіаційного ризику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика радіоактивного забруднення грибів на Поліссі перебуває в полі постійної уваги українських дослідників. Гродзинська А. А., Небесний В. Б. та ін. у 2022 році провели масштабне дослідження накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr дикорослими грибами на ділянках із контрастним радіаційним навантаженням у Житомирському Поліссі та зафіксували, що серед усіх досліджених видів найвищий рівень активності ^{137}Cs демонструють симбіотрофні таксони [2]. Орлов О. О., Жуковський О. В., Курбет Т. В. та співавтори в 2023 р. дослідили забруднення плодових тіл грибів у 18 пробних площадках Коростенського р-ну Житомирської обл. в різних типах лісорослинних умов і встановили чітку видову диференціацію рівнів накопичення ^{137}Cs залежно від трофічної групи гриба [3].

Краснов В. П., Жуковський О. В. та ін. (2024) провели дослідження сучасного розподілу ^{137}Cs у ґрунтах різних типів лісорослинних умов чорновільхових насаджень Житомирського Полісся, показавши, що мінеральний шар ґрунту є основним депо радіонукліда [4]. Паралельно Краснов В. П. та ін. (2022) встановили динаміку накопичення ^{137}Cs журавлиною болотною (*Vaccinium oxococcus* L.) на сфагнових болотах впродовж 34 років після аварії, зафіксувавши суттєве зниження питомої активності в порівнянні з ранньочорнобильським часом [5]. Лукаш О., Ткаченко Г. та ін. (2024) встановили особливості накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr домінантами та кодомінантами березово-соснових лісових угруповань Північної України, виявивши статистично значущі кореляції між показниками ґрунтового забруднення та вмістом радіонуклідів у рослинному матеріалі [6].

Закордонні публікації підтверджують загальну тенденцію. Аналіз даних із північно-східної Польщі (2025) для 230 зразків 19 видів дикоїдних грибів виявив сильну позитивну кореляцію між активністю ^{137}Cs у ґрунті та сухою масою грибів (коефіцієнт Спірмена $Rho = 0,81$, $p = 0,042$), що підтверджує принципову прогностичну цінність ґрунтових вимірювань для оцінки забруднення грибів [7]. Тривалий (1987–2023) аналіз вертикальної міграції ^{137}Cs у ґрунті після Чорнобильської катастрофи (Греція) засвідчив, що загальний рівень депонування радіонукліда у профілі 0–30 см залишається стабільним, однак відбувається поступове переміщення актив-

ності у нижні шари [8]. Роботи щодо довготривалої стабільності запасів радіоцезію в лісах, постраждалих від аварії на АЕС Фукусіма, виявили квазірівноважний стан обміну ^{137}Cs між ґрунтом і деревами після 6 і більше років від аварії [9], що узгоджується з інерційністю системи лісова підстилка–ґрунт–міцелій у поліських умовах.

Гродзинська Г., Небесний В. та Тесленко І. (2023) у ретроспективному дослідженні за 1991–2021 рр. у 66 видів грибів Чернігівського Полісся показали, що активність радіоцезію зменшувалась з часом, однак зберігала виражену видову специфічність і залежність від щільності ґрунтового забруднення [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний масив емпіричних даних щодо забруднення грибів і ґрунтів Полісся, низка питань залишається невирішеною. По-перше, відсутні актуалізовані (за 2021–2025 рр.) регресійні моделі для конкретних видів і типів лісорослинних умов Полісся, побудовані на основі системного одночасного відбору зразків грибів та ґрунту. По-друге, не розмежовані внески ґрунтових горизонтів (підстилка і мінеральна частина) у формування агрегованого коефіцієнта переходу (Tag) для симбіотрофних і сапротрофних видів. По-третє, не верифіковані математичні моделі, що дозволяли б прогнозувати накопичення ^{137}Cs у грибах різних трофічних груп за відомою щільністю забруднення ґрунту з урахуванням рН, вмісту органічної речовини та обмінного калію. Саме ці питання є предметом представленого дослідження.

Новизна. Уперше для умов Полісся України побудовані порівняльні регресійні моделі залежності питомої активності ^{137}Cs у плодових тілах грибів різних трофічних груп від щільності ґрунтового забруднення з одночасним урахуванням агрохімічних параметрів ґрунту. Новим є встановлення нелінійного (степеневого) характеру залежності для гіперакумуляуючих видів-симбіотрофів та обґрунтування видової специфічності агрегованого коефіцієнта переходу в умовах різних типів лісорослинних умов – від свіжих бідних борів (A_2) до вологих відносно бідних борів (B_3).

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід до математичного моделювання накопичення ^{137}Cs грибами має загальнонаукове значення як методологічна основа для побудови аналогічних моделей для ягідних рослин та інших нелісгосподарських продуктів радіоактивно забруднених лісових екосистем. Поєднання регресійного аналізу з агрохімічними предикторами відкриває шлях до більш точного прогнозування радіаційного ризику у системі ґрунт–організм ніж стандартний однофакторний підхід.

Викладення основного матеріалу. Польові дослідження проводились на постійних пробних площах у Коростенському та Овруцькому районах

Житомирської обл. у серпні–жовтні 2022–2024 рр. Усього закладено 24 пробні площі площею 400 м² кожна у 3 основних типах лісорослинних умов (ТЛУ): A_2 (свіжий бідний бір), B_2 (свіжий відносно бідний бір), B_3 (вологий відносно бідний бір). На кожній площі відбирали зразки плодових тіл грибів (не менше 5 плодових тіл одного виду) та ґрунтових зразків по горизонтах: підстилка (L+F+H) і мінеральний шар (0–5, 5–10, 10–20 см). Паралельно на кожній пробній площі відбирали зразки для агрохімічного аналізу (рН, вміст органічного вуглецю, обмінний калій, фізична глина).

Питому активність ^{137}Cs у ґрунтових та рослинних зразках визначали на гамма-спектрометричному комплексі з детектором ORTEC GEM-30 (США) після їх висушування (105 °С, 24 год), подрібнення та калібрування за стандартними зразками. Похибка вимірювань не перевищувала $\pm 8\%$ при довірчому інтервалі 0,95. Щільність ґрунтового забруднення ^{137}Cs (кБк·м⁻²) розраховували на основі інтегрування питомої активності за горизонтами ґрунтового профілю до глибини 30 см.

Агрегований коефіцієнт переходу (Tag) обчислювали як відношення питомої активності радіонукліда у плодовому тілі (Бк·кг⁻¹ сухої маси) до щільності ґрунтового забруднення (кБк·м⁻²). Регресійний аналіз здійснювали у середовищі R (версія 4.3.3); для перевірки значущості кореляції використовували коефіцієнт Спірмена при рівні значущості $p < 0,05$.

Результати вимірювань демонструють суттєву варіабельність питомої активності ^{137}Cs у грибах залежно від виду та ТЛУ (Таблиця 1). Гриби-симбіотрофи демонстрували найвищі значення: середня питома активність *Imleria badia* на площах типу B_2 становила 1340 ± 210 кБк·кг⁻¹ сухої маси при щільності ґрунтового забруднення 480–620 кБк·м⁻², *Cortinarius caperatus* – 980 ± 170 кБк·кг⁻¹, *Tricholoma equestre* – 870 ± 155 кБк·кг⁻¹. Натомість ксилотрофні сапротрофи *Armillaria mellea* та *Tapinella atrotomentosa* показали питому активність у межах 45–120 кБк·кг⁻¹ за тієї ж щільності ґрунтового забруднення.

Для аналізу кількісних залежностей між щільністю ґрунтового забруднення (X , кБк·м⁻²) та питомою активністю ^{137}Cs у плодових тілах грибів (Y , кБк·кг⁻¹) перевірявся як лінійний ($Y = aX + b$), так і степеневий ($Y = aX^b$) варіанти регресійної моделі. Для симбіотрофів кращі результати забезпечував степеневий варіант: для *Imleria badia* отримано залежність $Y = 0,31 \cdot X^{1,18}$ ($R^2 = 0,87$, $p < 0,001$), що вказує на дещо більш ніж лінійне зростання накопичення зі збільшенням ґрунтового забруднення. Для ксилотрофних сапротрофів лінійна модель показала достатню адекватність: $Y = 0,12 \cdot X - 4,5$ ($R^2 = 0,78$, $p < 0,01$). Такий характер залежності узгоджується з даними про те, що статистично значима позитивна кореляція між активністю ^{137}Cs у ґрунті та в плодових тілах грибів була підтверджена і для польських дикорослих грибів (коефіцієнт Спірмена 0,81) [7].

Таблиця 1

Питома активність ^{137}Cs (кБк·кг⁻¹ сухої маси) та агрегований коефіцієнт переходу (Tag, м²·кг⁻¹) для основних видів грибів на пробних площах різних ТЛУ

Вид гриба	Трофічна група	ТЛУ	Питома активність ^{137}Cs (кБк·кг ⁻¹)	Щільність забруд. ґрунту (кБк·м ⁻²)	Tag (м ² ·кг ⁻¹)
<i>Imleria badia</i>	Симбіотроф	B ₂	1340 ± 210	550	2,44
<i>Cortinarius caperatus</i>	Симбіотроф	B ₂	980 ± 170	550	1,78
<i>Tricholoma equestre</i>	Симбіотроф	B ₃	870 ± 155	520	1,67
<i>Paxillus involutus</i>	Симбіотроф	A ₂	560 ± 95	390	1,44
<i>Boletus edulis</i>	Симбіотроф	B ₂	78 ± 18	550	0,14
<i>Armillaria mellea</i>	Ксилотроф-сапротроф	B ₂	62 ± 14	550	0,11
<i>Tapinella atrotomentosa</i>	Ксилотроф-сапротроф	B ₃	45 ± 9	520	0,09

Примітка: значення ± відповідає стандартному відхиленню, n = 5–8 плодівих тіл.

Аналіз впливу агрохімічних параметрів ґрунту засвідчив, що рН є одним із найвагоміших чинників, які модифікують Tag. На площах з рН < 4,5 (типів для бідних борів А₂ та В₂) значення Tag для симбіотрофів були у 1,5–2,1 рази вищими, ніж на площах з рН 5,0–5,5. Вміст обмінного калію також обернено корелює з Tag: зі збільшенням вмісту К₂О від 50 до 120 мг·кг⁻¹ ґрунту Tag знижується приблизно на 30–40 %, що пояснюється конкурентним антагонізмом між Cs⁺ та K⁺ при надходженні через клітинні мембрани міцелію.

Розподіл ^{137}Cs у ґрунтовому профілі виявився нерівномірним: у ТЛУ В₃ до 68,1 % загальної активності зосереджено у шарі 0–10 см (переважно в нижньому шарі підстилки та верхніх 5 см мінеральної частини), що підтверджується матеріалами паралельних досліджень у чорновільхових лісах Житомирського Полісся [4]. Цей шар є зоною максимального розвитку мікоризних гіф, що безпосередньо пояснює гіперакумулятивний потенціал симбіотрофних грибів. На відміну від цього у ТЛУ А₂ підстилка утримує лише 13,4 % від загальної активності, тоді як мінеральний шар є основним депо.

Порівняльний аналіз зразків із сфагнових болітних ділянок показав, що Tag для ягідних рослин (зокрема *Vaccinium oxococcus*) у відповідних умовах значно нижчий порівняно з грибами-симбіотрофами: відношення питомих активностей становило в середньому 1:12–1:18, що підтверджує принципово різні механізми надходження ^{137}Cs у плодіві тіла грибів та надземну фітомасу ягідників. Це узгоджується з даними про низький рівень питомої активності журавлини на сфагнових болотах Полісся після 34 років з моменту аварії [5].

Для практичного застосування важливо, що побудовані моделі дозволяють класифікувати пробні площі за ризиком перевищення гранично допустимого рівня активності у грибах (2500 Бк·кг⁻¹ сухої

маси згідно з чинними нормами в Україні). Для симбіотрофних видів ризик перевищення виникає вже при щільності ґрунтового забруднення понад 150–200 кБк·м⁻², тоді як для сапротрофів критичний поріг становить близько 400–500 кБк·м⁻². Ці граничні значення мають практичне значення для зонування лісових угідь щодо права збору грибів.

Головні висновки. Встановлено, що між щільністю ґрунтового забруднення ^{137}Cs та питомою активністю радіонукліда у плодівих тілах дикорослих грибів Полісся України існує достовірна позитивна кореляція, характер якої суттєво відрізняється для різних трофічних груп: для симбіотрофів вона краще описується степенною, для сапротрофів – лінійною моделлю. Значення агрегованого коефіцієнта переходу Tag варіює від 0,09 до 2,44 м²·кг⁻¹ залежно від виду гриба та типу лісорослинних умов. Агрохімічні параметри ґрунту – рН та вміст обмінного калію – достовірно модифікують Tag і мають включатися до складу прогностичних моделей. Встановлено, що граничне значення щільності ґрунтового забруднення для неперевищення ГДР за вмістом ^{137}Cs становить 150–200 кБк·м⁻² для симбіотрофних видів та 400–500 кБк·м⁻² для сапротрофних.

Перспективи використання результатів дослідження. Побудовані регресійні моделі рекомендуються використовувати для прогнозування рівнів забруднення грибів у межах лісового фонду Полісся при проведенні радіоекологічного моніторингу та зонування доступу населення до збору дикорослих грибів і ягід. Перспективним напрямом є розширення бази даних шляхом включення додаткових видів-симбіотрофів, а також верифікація моделей для умов сфагнових боліт, де механізми міграції ^{137}Cs суттєво відрізняються від мінеральних лісових ґрунтів. У подальшому передбачається розроблення ГІС-сумісного інструменту прогнозування на основі отриманих рівнянь і картографічних даних щільності ґрунтового забруднення.

Література

1. Grodzinskaya A. A., Nebesnyi V. B., Landin V. P., Gabriel J. Radioactive contamination of wild mushrooms from Ukraine under conditions of contrasting radiation loads: 36 years after the Chernobyl Nuclear Power Plant catastrophe. *International Journal of Medicinal Mushrooms*. 2022. Vol. 24, No. 9. P. 25–40. doi: 10.1615/IntJMedMushrooms.2022044725. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36004707/>
2. Grodzynska G., Nebesnyi V., Teslenko I. Radioactive contamination of wild mushrooms in Chernihiv Polesie. *Biota. Human. Technology*. 2023. No. 2. P. 55–72. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4223/9fce05080712b54ed4ead105655d97a4c5c1.pdf>
3. Kalda G. S., Shevelya V. V., Rybalka K. A., Żywiec J. Analysis of radioactive contamination for the regions of Ukraine and Poland. *Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*. 2022. Vol. 6 (012). P. 59–65. doi: 10.30838/j.bpsacea.2312.271222.59.911. URL: <http://uajcea.pgasa.dp.ua/article/view/271959>
4. Krasnov V. P., Zhukovskiy O. V., Sukhovetska S. V., Orlov O. O., Melnyk-Shamrai V. V., Kurbet T. V. Features of the modern distribution of ^{137}Cs in soils under overmoistened growth conditions of black alder forests in Zhytomyr Polissia, Ukraine. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2024. Vol. 25, No. 2. P. 149–157. URL: <https://jnpae.kinr.kyiv.ua/25.2/html/jnpae-2024-25-0149-Krasnov.html>
5. Krasnov V., Ivanyuk I., Zhukovsky O., Kurbet T., Orlov O. Dynamics of ^{137}Cs accumulation by cranberry on sphagnum bogs of Polissia of Ukraine. *Scientific Horizons*. 2022. Vol. 25, No. 1. P. 68–75. doi: 10.48077/scihor.25(1).2022.68-75. URL: <https://sciencehorizon.com.ua/en/journals/tom-25-1-2022/dinamika-nakopichennya-137cs-zhuravlinoyu-bolotnoyu-na-sfagnovikh-bolotakh-polissya-ukrayini>
6. Lukash O., Tkaczenko H., Yakovenko O., Szikura A., Kurhaluk N. Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr radionuclides by dominants and co-dominants of birch-pine forest communities in Northern Ukraine. *iForest – Biogeosciences and Forestry*. 2024. Vol. 17, No. 6. P. 386–393. doi: 10.3832/for4577-017. URL: <https://iforest.sisef.org/abstract/?id=ifor4577-017>
7. Łażniewska J., Falandysz J. Forty years after Chernobyl: radiocaesium in wild edible mushrooms from north-eastern Poland and its relevance for dietary exposure and food safety. *Toxics*. 2025. Vol. 13, No. 7. Article 601. doi: 10.3390/toxics13070601. URL: <https://www.mdpi.com/2305-6304/13/7/601>
8. Manolopoulou M., Fragkos-Livanios L., Papastefanou C. Long-term study (1987–2023) on the distribution of ^{137}Cs in soil following the Chernobyl nuclear accident: a comparison of temporal migration measurements and compartment model predictions. *Radiation Protection Dosimetry*. 2023. Vol. 199, No. 19. P. 2366–2374. doi: 10.1093/rpd/ncad278. URL: <https://academic.oup.com/rpd/article/199/19/2366/7267612>
9. Ohashi S., Kuroda K., Kagawa A., Sugiyama M., Komatsu M., Kaneko S. Decadal stability of radiocaesium inventories and soil to tree transfer in forests affected by the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. doi: 10.1038/s41598-025-34898-0. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-34898-0>
10. Orlov O. O., Zhukovskiy O. V., Kurbet T. V., Shevchuk V. V., Sukhovetska S. V. Current ^{137}Cs accumulation by mushrooms in different site types of scots pine forests of Ukrainian Polissia. *Nuclear Physics and Atomic Energy*. 2023. Vol. 24, No. 3. URL: <https://www.researchgate.net/publication/354060243>

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

MATHEMATICAL MODELING OF THE ELECTROCHEMICAL DETERMINATION OF FIPRONIL USING A COMPOSITE SENSOR BASED ON TRIAZOLIC SCHIFF BASES AND VANADIUM(III) OXYHYDROXIDE

Tkach V.¹, Morozova T.², Isabel O'Neill Gaivão¹, José Inácio Ferrão da Paiva Martins³

¹University of Trás-os-Montes and Alto Douro

5000-105, Quinta de Prados, Folhadela, Vila Real, Portugal

²State Scientific Institution "Institute of Ecological Restoration and Development of Ukraine"

Mytropolite Vasyl Lypkivsky Str., 35, 01001, Kyiv

³Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

4200-065, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Porto, Portugal

tetiana.morozova@ukr.net

This study explores the electrochemical determination of the phenylpyrazole insecticide fipronil using a novel composite sensing material based on triazolic Schiff bases and vanadium(III) oxyhydroxide, VO(OH). Fipronil is among the most extensively used insecticides in agriculture and veterinary medicine, and its environmental persistence, bioaccumulation potential, and toxicity toward non-target organisms underscore the need for sensitive, selective, and rapid analytical methods for its detection in environmental matrices.

The proposed sensing platform incorporates VO(OH) as the electroactive component of the modified electrode, while the synthesized triazolic Schiff bases serve a dual role by facilitating electron transfer and stabilizing the composite architecture. This synergistic combination enhances the electrocatalytic activity, operational stability, and reproducibility of the analytical response.

A mathematical model describing the electrochemical behavior of the sensor was developed by considering fipronil adsorption, interfacial charge-transfer reactions, mediator regeneration, and analyte interactions with the composite surface. The model was analyzed using linear stability theory and bifurcation analysis to elucidate the dynamic behavior of the sensing system over a broad range of kinetic and physicochemical conditions. Particular emphasis was placed on identifying the parameter domain that ensures stable sensor operation and optimal analytical performance.

The theoretical investigation demonstrates that the cathodic electrochemical process occurring at the electrode modified with the triazolic Schiff base–VO(OH) composite provides a favorable mechanism for the determination of fipronil in mildly acidic media. Under these conditions, the sensor is predicted to generate a well-defined, highly reproducible electrochemical response exhibiting a linear dependence on analyte concentration, thereby enabling reliable quantitative determination.

The dynamic behavior of the sensing system was also evaluated. The analysis predicts that both oscillatory and monotonic instabilities may arise under specific kinetic conditions; however, these regimes are confined to a narrow parameter range and are therefore unlikely to affect sensor performance under practical analytical conditions.

Overall, the obtained results provide a solid theoretical foundation for the development of highly sensitive electrochemical sensors for monitoring fipronil in environmental and agricultural samples. Moreover, the proposed modeling approach offers valuable insights for the rational design of advanced composite sensing materials intended for the electrochemical detection of persistent organic pollutants. *Key words:* intoxication prevention, fipronil, vanadium (III) oxyhydroxide, Schiff bases, electrochemical sensors, stable steady-state.

Математичне моделювання електрохімічного визначення фіпронілу із застосуванням композитного сенсорного матеріалу на основі триазольних основ Шиффа та оксигідроксиду ванадію(III). Ткач В.В., Морозова Т.В., Ізабель Гайван О'Ніл, да Пайва Мартінш Ж.І.Ф.

Окреслено електрохімічне визначення інсектициду фіпронілу із застосуванням нового композитного сенсорного матеріалу на основі триазольних основ Шиффа та оксигідроксиду ванадію(III) VO(OH). Фіпроніл є одним із найпоширеніших інсектицидів фенілпіразольної групи, який широко використовується у сільському господарстві та ветеринарній практиці. Висока персистентність цієї сполуки в навколишньому середовищі, її здатність до накопичення та токсичний вплив на нецільові організми зумовлюють потребу у створенні чутливих, селективних, швидких і надійних методів контролю її вмісту в об'єктах довкілля.

Запропонований сенсорний матеріал містить оксигідроксид ванадію(III) як електроактивний компонент модифікованого електрода, тоді як синтезовані триазольні основи Шиффа виконують подвійну функцію: забезпечують ефективне перенесення електронів та стабілізують структуру композиту. Така організація сенсорного шару сприяє підвищенню електрокаталітичної активності, стабільності функціонування та відтворюваності аналітичного сигналу.

Для теоретичного опису роботи сенсора розроблено математичну модель, яка враховує адсорбцію фіпронілу на поверхні електрода, перебіг електродних реакцій, регенерацію медіатора та взаємодію аналіту з композитним модифікатором. Аналіз



моделі виконано із застосуванням методів теорії лінійної стійкості та біфуркаційного аналізу, що дало змогу встановити закономірності функціонування електрохімічної системи за різних кінетичних і фізико-хімічних умов, а також визначити діапазони параметрів, у межах яких забезпечується її стійкий аналітичний режим.

Результати теоретичного дослідження свідчать, що катодний електрохімічний процес на електроді, модифікованому композитом на основі триазольної основи Шиффа та VO(OH), є перспективним для визначення фіпронілу у слабкокислому середовищі. За цих умов формується чіткий, відтворюваний електрохімічний сигнал, величина якого лінійно залежить від концентрації аналіту, що створює передумови для його кількісного визначення.

Окрему увагу приділено аналізу динамічної поведінки електрохімічної системи. Встановлено, що за певних співвідношень кінетичних параметрів можливе виникнення як осциляторних, так і монотонних нестійкостей. Водночас результати моделювання показали, що такі режими реалізуються лише за вузького діапазону параметрів і не повинні істотно впливати на роботу сенсора в умовах практичного аналізу.

Отримані результати формують теоретичне підґрунтя для конструювання високочутливих електрохімічних сенсорів нового покоління, призначених для моніторингу фіпронілу в природних водах, ґрунтах, сільськогосподарській продукції та інших складних об'єктах аналізу. *Ключові слова:* профілактика інтоксикації; фіпроніл; оксигідроксид ванадію(III); основи Шиффа; електрохімічні сенсори; стійкий стаціонарний стан.

Introduction. In July and August 2017, more than 50 egg poisoning cases outbreak throughout the 15 member states of European Union plus Switzerland and Hong Kong [1–2]. Most of the people hospitalized during this outbreak were Dutch, German, French and Belgian citizens and the outbreak forced to shut down temporarily about 180 farms in the Netherlands.

An investigation was carried on and it revealed that the overdose of fipronil (Fig. 1), used as a vet drug to protect the poultry from parasite infections had caused the poisoning.

Fipronil (Fig. 1) (5-amino-1-[2,6-dichloro-4-(trifluoromethyl)phenyl]-4-(trifluoromethylsulfinyl)pyrazole-3-carbonitrile) is used as a broad-spectrum insecticide, employed to control the population of insects, harmful to man [1–5]. It is also used as drug for treatment and prevention of parasitic infections, generally for veterinary use [2]. Its mechanism of action includes disruption of chloride passage through GABA-mediated channels in nerve cell membranes, resulting in terminal neurologic malfunction [2]. It is an active substance of different commercial formulations like Regent®, Frontline®, Termidor®, 4fleas®, Activo®, Alfamed® among others [3–5].

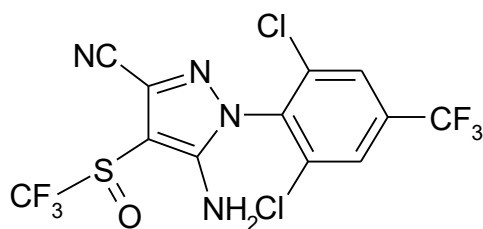


Fig. 1. Fipronil

It is used against beetles, ticks, seas, termites and other pests. It is currently registered in more than 70 countries for the control of insect pests in more than hundred crops like corn, soybean, sugar cane and wheat [3–5].

Fipronil is classed by World Health Organization as Class II moderately hazardous pesticide [6].

The major metabolite of fipronil (Figure 2) [7] in vertebrates and invertebrates appears to be fipronil sulfone [8]. On plants and in soils, fipronil undergoes a photoextrusion reaction, yielding a desulfinyl derivative [8]. There have been limited studies of the degradation of fipronil on the surface (skin) of domestic species, particularly dogs and cats. It has been reported that basic conditions (pH > 7) and increased temperatures will induce hydrolysis of fipronil [9], conditions, that may occur on the skin surface of mammals.

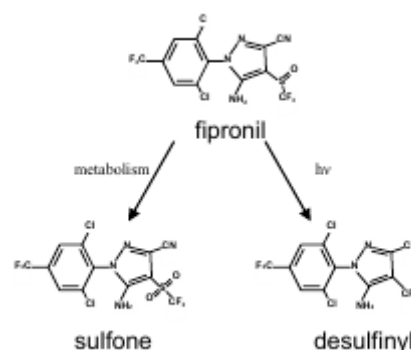


Fig. 2. Fipronil metabolism. Reproduced from [7]

The selective toxicity of fipronil will therefore depend on the relative rate of conversion to the more persistent and less selective sulfone metabolite and desulfinyl photoproduct [10]. The desulfinyl photoproduct, in particular, has a 10 fold greater selectivity for mammalian GABA chloride channels than the parent compound [8]. No directly applicable data are available on the influence of degradation products on the toxicity of Fipronil applied to target animals.

The intoxication symptoms include sweating, nausea, vomiting, headache, abdominal pain, dizziness, agitation, weakness, and tonic-clonic seizures [11, 12]. The U.S. EPA has classified fipronil as a group C (possible human) carcinogen based on an increase in thyroid follicular cell tumors in both sexes of the rat [12].

Its ecotoxicity for crustaceans, insects and zooplankton is very high [13]. Its half-life lasts four months to one year

depending on the media. It is relatively stable in water, but it's not so stable in soil, due to its photolysis. Thus, the development of a precise, exact, rapid and efficient method of its quantification is really actual task [14–16].

For now, three works concerning fipronil electrochemical determination are known. Two of them are authored by Brazilian groups [17, 18], and the third one is our theoretical investigation, in which the $\text{CoO}(\text{OH})$ -assisted fipronil electrochemical determination is foreseen [19]. Either cathodical or anodical processes may be applied. Nevertheless, the cathodical process is more efficient in energetical terms, due to the presence of the acceptor groups in fipronil molecule.

One of the cathode modifiers, capable to be used for this purpose is vanadium(III)oxyhydroxide [20, 21], a compound with the possibility of semiconducting properties and flexible electrochemical behavior, but more inclined to be reductant. In order to enhance the vanadium (III) oxyhydroxide stability in acidic medium, the triazolic derivatives like those described in [22, 23] may be used as stabilizers.

The electroanalytical behavior of $\text{VO}(\text{OH})$ hasn't been described experimentally, due to the relative novelty of the proper material. However, it is theoretically predicted in our previous works [24–26].

It is important to consider that the development of a principally new electrode modifier for a new analyte may confront some problems, like:

- the indecision about the mechanism of electrochemical action of the electrode modifier with the analyte;
- the possibility of the appearance of electrochemical instabilities, characteristic for the electrosynthesis and action of $\text{CoO}(\text{OH})$, a similar compound [19, 27, 28].

These problems may be solved, if the experimental essays are preceded by an *a priori* theoretical investigation of the electroanalytical system. So, in this work, the

theoretical mechanistic investigation of fipronil electrochemical determination, assisted by $\text{VO}(\text{OH})$, stabilized by a novel Schiff base, is given. Also the behavior of this system is compared with that of the similar electroanalytical processes [24–28].

System and its modeling.

Experimental. 5-adamantyl-4-amino-1,2,4-triazole-3-thiol has been provided as a courtesy by Zaporizhzhya state medical university. 9-formylanthracene aldehyde has been used from the stores of Chernivtsi National University. Acetic acid has been acquired from Sfera Sim (Lviv) and used without further purification. The ^1H NMR experiment has been carried out in Enamin (Kiev, Ukraine) by Varian Mercury 400 spectrometer (400 MHz) in DMSO-d_6 . The reaction has been realized as in the Fig. 3.

The solution of 0,26 g (0,00125 mol) of 9-formylanthracene in 5 ml of acetic acid was added to the hot solution of 0,33 g (0,00125 mol) of 5-adamantyl-4-amino-1,2,4-triazole-3-thiol in 10 ml of acetic acid. Further, it was kept for 12 hours in the room temperature. The brightly yellow fluorescent crystalline compound has been filtered out, rinsed by water and dried. Yield 0,40 g (66%). Crystallized by water from DMF solution. M.p. 238 °C. Found: C: 73,75%, H: 5,75%, N: 12,52%. $\text{C}_{27}\text{H}_{26}\text{N}_4\text{S}$. Calculated: C: 73,94%, H: 5,97%, N: 12,77%.

The ^1H NMR shifts of the Schiff base may be given as on the Fig. 4.

Fipronil is reduced on the first stage by vanadium (III) oxyhydroxide in aqueous media as on the Fig. 5.

The reduction product is also capable to be reduced in the presence of $\text{VO}(\text{OH})$ either by sulfur atom (Fig. 6) or by heterocyclic ring scission (Fig. 7).

Both of the processes include rearrangements in the double electric layer (DEL), capable to cause the oscillatory behavior and other dynamic phenomena.

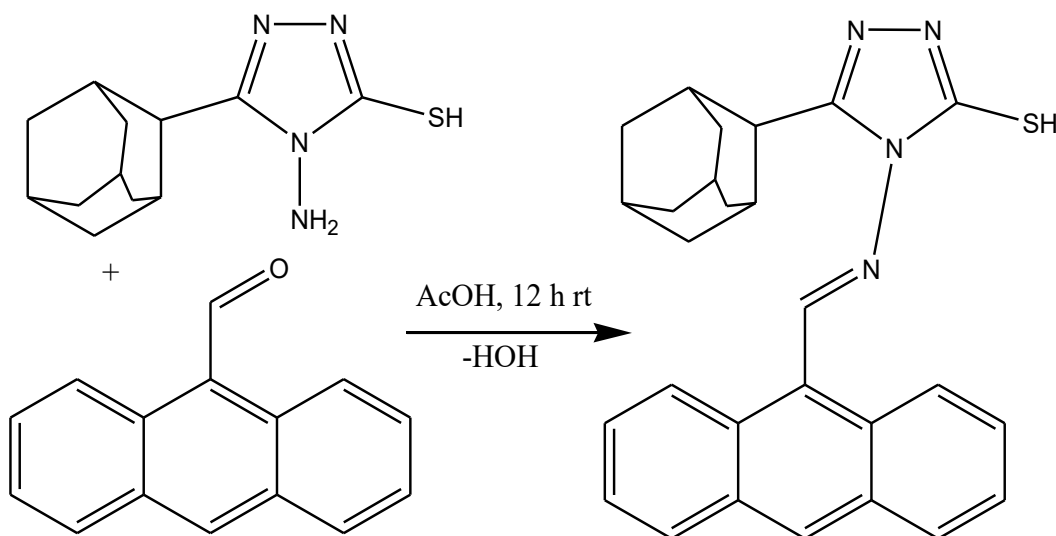


Fig. 3. Synthesis of the triazolic Schiff base

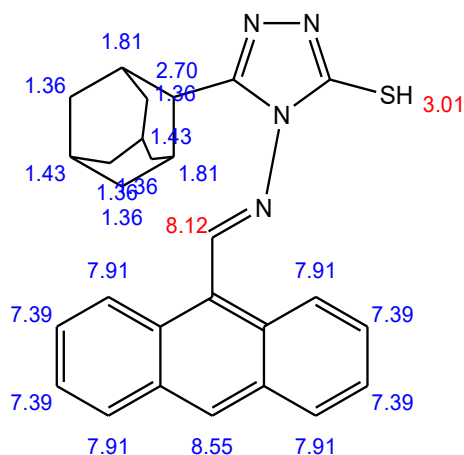


Fig. 4. The PMR shifts of the Schiff base

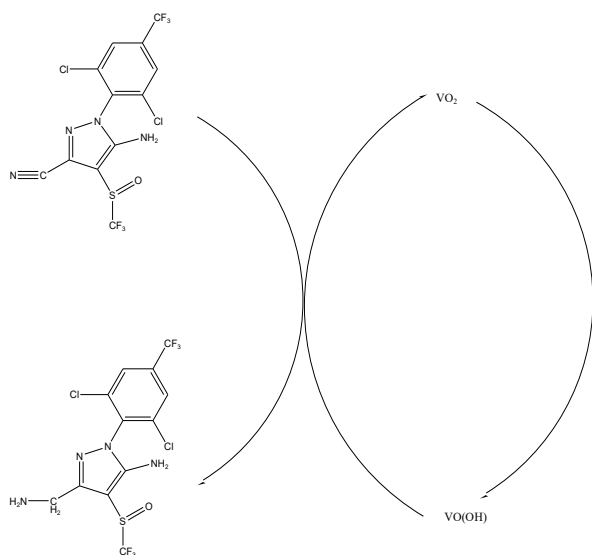


Fig. 5. VO(OH)-assisted fipronil reduction

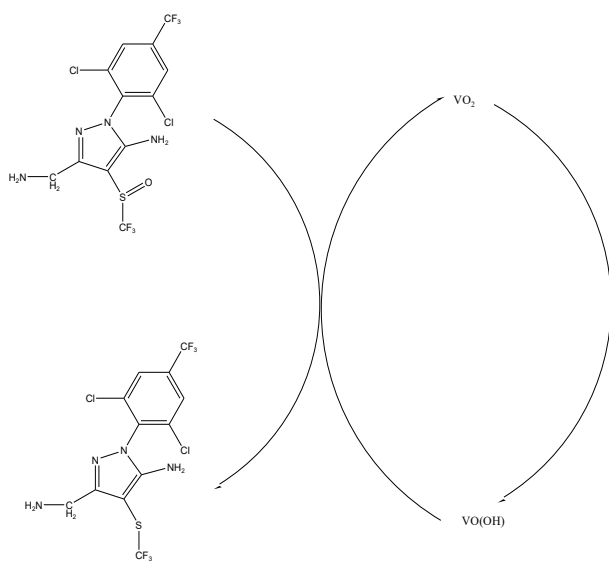


Fig. 6. Sulfur atom reduction by VO(OH)

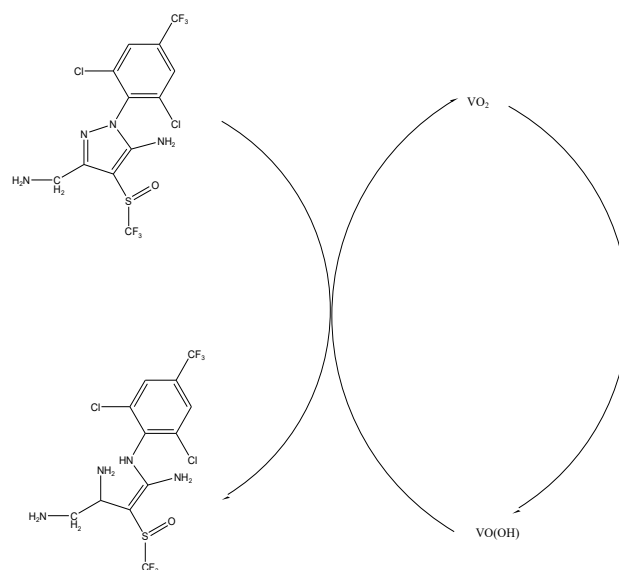


Fig. 7. VO(OH)-assisted ring scission

So, in order to describe the gyromitrin electrochemical determination, we introduce three variables:

f – fipronil concentration in the pre-surface layer;

n – nitrile reduction product concentration in the pre-surface layer;

θ – vanadium dioxide triazolic complex surface coverage degree.

To simplify the modeling, we suppose that the reactor is intensively stirred, so we can neglect the convection flow. Also we suppose that the background electrolyte is in excess, so we can neglect the migration flow. The pre-surface layer thickness is assumed to be constant, equal to δ , and the concentration profile of the analyte to be linear.

It is possible to show that the system's behavior will be described by the following trivariant equation set:

$$\begin{cases} \frac{df}{dt} = \frac{2}{\delta} \left(\frac{\Delta}{\delta} (f_0 - f) - r_{15} \right) \\ \frac{dn}{dt} = \frac{2}{\delta} (r_{15} - r_{16} - r_{17}) \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{G} (r_{14} + r_{15} + r_{17} - r_2) \end{cases} \quad (1)$$

In which f_0 is the fipronil bulk concentration, Δ is the diffusion coefficients, G is the VO_2 complex maximal surface concentration, and the parameters r are the chemical and electrochemical stages rates, capable to be calculated as:

$$r_{15} = k_{15} f (1 - \theta)^6 \exp(-\alpha\theta) \quad (2)$$

$$r_{16} = k_{16} n (1 - \theta)^4 \exp(-\alpha\theta) \quad (3)$$

$$r_{17} = k_{17} n (1 - \theta)^4 \exp(-\alpha\theta) \quad (4)$$

$$r_2 = k_2 \theta \exp\left(-\frac{F\phi_0}{RT}\right). \quad (5)$$

Here, the parameters k stand for the correspondent rate constants, α and β are parameters, relating DEL capacitance to the coverage degree, F is the Faraday number, ϕ_0 is the potential slope related to the zero-charge potential, R is the universal gas constant and T is the absolute temperature.

The DEL influences of the complex configuration changes make the system's behavior more dynamic. Moreover, as the reduction process is "branched", all of its stages are capable to alter the DEL capacitance, conductivity and ionic composition. Even though, the electroanalytical process will be efficient, as shown below.

Results and discussion. In order to describe the fipronil electrochemical detection, assisted by vanadium(III)oxyhydroxide, stabilized by triazolic derivatives, we analyze the equation-set (1) by means of the linear stability theory. The steady-state Jacobian functional matrix members may be described as:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (6)$$

in which:

$$a_{11} = \frac{2}{\delta} \left(-\frac{\Delta}{\delta} - k_{15}(1-\theta)^6 \exp(-\alpha\theta) \right) \quad (7)$$

$$a_{12} = 0 \quad (8)$$

$$a_{13} = \frac{2}{\delta} \left(6k_{15}f(1-\theta)^5 \exp(-\alpha\theta) - \alpha k_{15}f(1-\theta)^6 \exp(-\alpha\theta) \right) \quad (9)$$

$$a_{21} = \frac{2}{\delta} \left(k_{15}(1-\theta)^6 \exp(-\alpha\theta) \right) \quad (10)$$

$$a_{22} = \frac{2}{\delta} \left(-k_{16}(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) - k_{17}(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) \right) \quad (11)$$

$$a_{23} = \frac{2}{\delta} \left(\begin{aligned} &-6k_{15}f(1-\theta)^5 \exp(-\alpha\theta) + \alpha k_{15}f(1-\theta)^6 \exp(-\alpha\theta) + \\ &4k_{16}n(1-\theta)^3 \exp(-\alpha\theta) - \alpha k_{16}n(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) + \\ &4k_{17}n(1-\theta)^3 \exp(-\alpha\theta) - \alpha k_{17}n(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) \end{aligned} \right) \quad (12)$$

$$a_{31} = \frac{1}{G} \left(k_{15}(1-\theta)^6 \exp(-\alpha\theta) \right) \quad (13)$$

$$a_{32} = \frac{1}{G} \left(k_{16}(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) + k_{17}(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) \right) \quad (14)$$

$$a_{33} = \frac{1}{G} \left(\begin{aligned} &-6k_{15}f(1-\theta)^5 \exp(-\alpha\theta) + \alpha k_{15}f(1-\theta)^6 \exp(-\alpha\theta) - \\ &4k_{16}n(1-\theta)^3 \exp(-\alpha\theta) + \alpha k_{16}n(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) - \\ &4k_{17}n(1-\theta)^3 \exp(-\alpha\theta) + \alpha k_{17}n(1-\theta)^4 \exp(-\alpha\theta) - \\ &k_2 \exp\left(-\frac{F\phi_0}{RT}\right) - jk_2\theta \exp\left(-\frac{F\phi_0}{RT}\right) \end{aligned} \right) \quad (15)$$

As in other systems with the use of vanadium oxyhydroxide as electrode modifier [24–26], the oscillatory behavior will be possible. Moreover, even though the surface instabilities are absent in this system, the oscil-

latory behavior will be relatively probable, as there are more than one process influencing the double electric layer (DEL) capacitances.

Beside of the element $-jk_2\theta \exp\left(-\frac{F\phi_0}{RT}\right) > 0$, if $j < 0$,

typical for all similar systems and describing the DEL influences of the electrochemical stage, the elements containing the parameter α outside the exponent are possible, if $\alpha > 0$ describe the DEL influences of the complex compound rearrangement on the chemical stages. All of these influences become more intensive beyond the detection limit, so they do not interfere significantly to the electroanalytical process. The oscillations are frequent and of small amplitude.

In order to investigate the *steady-state stability*, we apply the Routh-Hurwitz criterion to the equation-set (1). By this, avoiding the cumbersome expressions, we introduce new variables, rewriting the determinant as:

$$\frac{4}{\delta^2 G} \begin{vmatrix} -\kappa - \Xi & 0 & \Omega \\ \Xi & -X & -\Omega + \Lambda \\ \Xi & X & -\Omega - \Lambda - P \end{vmatrix} \quad (16)$$

Opening the straight brackets of the determinant, applying to it the inequity, salient from the criterion, we may obtain the steady-state stability condition, described as:

$$(-\kappa - \Xi)(2X\Omega + XP) + 2\Xi X\Omega < 0. \quad (17)$$

Which may be rearranged into:

$$-2\kappa X\Omega - (\kappa + \Xi)XP < 0. \quad (18)$$

Depicting an electroanalytically efficient diffusion-controlled system. This is realized, if the parameters, describing the system's behavior during the chemical and electrochemical stages Ξ , X , Ω and P are positive. Really, if we suppose them to be positive, the left side of the inequation (18) will be more negative, stabilizing the steady-state. Taking into account the inexistence of side reactions in the pH chosen for this system (neutral or lightly acidic), the steady-state will be electroanalytically efficient, correspondent to the linearity of the dependence between concentration and electrochemical parameter (in this case, current).

The monotonic instability, related to the detection limit, will be realized in the point of:

$$-2\kappa X\Omega - (\kappa + \Xi)XP = 0. \quad (19)$$

In this point, correspondent to the saddle-node bifurcation, the limit between stable steady-states and unstable states is posed. It is correspondent to the equity between the stabilizing and destabilizing influences.

This electrode may be used for fipronil determination either in vitro, or in vivo (in plant and animal organisms). The selectivity is achieved, due to the difference in the reaction of fipronil and other pesticides used for plant protections with vanadium (III) oxyhydroxide. It

is possible to substitute triazoles by other basic organic compounds, capable to stabilize vanadium (III) oxyhydroxide. The compounds may be either micro or macromolecular, and the behavior of this system will also be described by this model.

Conclusions. From the theoretical investigation of the possibility of the fipronil electrochemical detection, assisted by vanadium(III) oxyhydroxide, stabilized by triazoles, it is possible to conclude that:

– VO(OH) may serve as an excellent modifier for fipronil electrochemical determination. The system is electroanalytically efficient, although the pesticide reduction process is ramified;

– The electroanalytical process tends to be diffusion-controlled;

– The oscillatory behavior in this system is possible, being more probable than in similar systems. The amplitude is expected to be small and the oscillations to be frequent.

References

1. Van der Merwe D., Jordaan A., van den Berg M. Chemical hazards in foods of animal origin. Amsterdam : Brill, 2019. P. 567–584. DOI: <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-877-3-23>.
2. Rosa L. E., Soares Cherem L. F., Siame L. Geological heritage and geodiversity assessment. *Boletim Goiano de Geografia*. 2023. Vol. 43. Article 70626. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v43i01.70626>.
3. Castagna D., Pacheco de Souza A., Gonçalves Vendrusculo L. et al. Risco de Desmatamento em áreas de Serrado Brasileiro, *Revista Brasileira de Geografia Física*. 2024. Vol. 17. P. 199–212. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p199-212>.
4. Feltes González O. A., Pérez de Molas L. F., Duré Rodas R. et al. *Handroanthus abayoy* (Bignoniaceae), nuevo registro para la flora del Paraguay *Candollea*. 2023. Vol. 78. P. 161–165. DOI: <https://doi.org/10.15553/c2023v782a7>.
5. Li, P.; Zhao, A.; Li, R.; Han, S.; Li, N.; Ji, L.; Lei, K. Identifying a Detoxifying Uridine Diphosphate Glucosyltransferase (UGT), MdUGT83K2, Which Can Glycosylate the Aryloxyphenoxypropionate Herbicide. *Agronomy* 2023, 13, 306. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020306>
6. Rajak B., Rani P., Mandal P. et al. Emerging possibilities in the advancement of herbicides to combat acetyl-CoA carboxylase inhibitor resistance *Frontiers in Agronomy*. 2023. Vol. 5. Article 1218824. DOI: 10.3389/fagro.2023.1218824.
7. Jalalat Z., Habibi-Yangjeh Z., Hemmati-Eslamlu P., Akinay Y. Anchoring modified g-C₃N₄ with Bi₅O₇Br: S-scheme photocatalysts with boosted activities in elimination of inorganic and organic pollutants *Inorganic Chemistry Communications*. 2023. Vol. 158. Article 111565. DOI: 10.1016/j.inoche.2023.111565.
8. Schelter ML, de Souza MP, Fontana de Freitas L, et al. Resistance of barnyardgrass biotypes (*Echinochloa crus-galli*) to ACCase-inhibiting herbicides in the main rice-growing regions of the state of Santa Catarina, Brazil. *Cienc Rural*. 2024;54(2):e20220384. doi:10.1590/0103-8478cr20220384.
9. Liu Y, Guo J, Liu W, et al. Effects of haloxyfop-p-methyl on the developmental toxicity, neurotoxicity, and immunotoxicity in zebrafish. *Fish Shellfish Immunol*. 2023;132:108466. doi:10.1016/j.fsi.2022.108466
10. Zhao Y, Ye F, Fu Y. Preparation, characterization, and application of carbon dots derived from food materials for food safety analysis: A review. *J Agric Food Chem*. 2023;71(9):3639-3650. doi:10.1021/acs.jafc.2c08815.
11. Sohrabi H, Sani PS, Orooji Y, et al. Nanotoxicity of carbon dots: Cytotoxicity, genotoxicity, and ecotoxicity. *Food Chem Toxicol*. 2023;165:113176. doi:10.1016/j.fct.2022.113176.
12. Rezaeivala M, Bozorg M, Rafiee N, et al. Recent advances in carbon quantum dots-based fluorescent nanosensors for food safety and quality analysis. *Inorg Chem Commun*. 2023;148:110323. doi:10.1016/j.inoche.2022.110323.
13. Zhu S, Sun B, Chen Y, et al. Recent advances in the surface chemistry of carbon dots: From preparation to applications. *J Mater Chem C*. 2019;7(25):7593-7600. doi:10.1039/C8TC06207B.
14. Almasi H, Forghani S. Carbon dots as emerging intelligent materials for food packaging and shelf-life extension: A review. *Food Packag Shelf Life*. 2022; 32: 100839. doi:10.1016/j.fpsl.2022.100839.
15. Yin J, Li HJ, Reddy VS, et al. Carbon dot-based biosensors for food safety and quality analysis: A review. *Biosensors (Basel)*. 2023;13(1):127. doi:10.3390/bios13010127.
16. Bordbar MM, Sheini A, Hashemi P, et al. Carbon dot-based fluorescent nanosensors for the determination of food contaminants: A review. *Biosensors (Basel)*. 2021;11(9):316. doi:10.3390/bios11090316
17. Tkach VV, Martins JIFP, Ivanushko YaG, Yagodynets PI. Dye electropolymerization for electroanalytical purposes. A brief review *Biointerface Res Appl Chem*. 2022; 12: 4028-4047. doi:10.33263/BRIAC123.40284047.
18. Liv LA. Carbon dots as electrochemical sensors and biosensors: A review. *Microchem J*. 2023; 195: 109425. doi:10.1016/j.microc.2023.109425.
19. Porfireva A, Plastinina K, Evtugyn V, et al. Electrochemical sensors based on carbon dots for food safety and biomedical analysis: Recent advances. *Sensors (Basel)*. 2021;21(9):2949. doi:10.3390/s21092949
20. Sugiyama K, Watanabe K, Sato K, et al. Electropolymerization of Azure A and pH Sensing Using Poly(azure A)-Modified Electrodes. *Anal Sci*. 2021;37(6):893-896. doi:10.2116/analsci.20P341.
21. Jalalat Z, Habibi-Yangjeh Z, Hemmati-Eslamlu P, Akinay Y. [Título não confirmado – DOI 10.1016/j.inoche.2023.111565]. *Inorg Chem Commun*. 2023; 158: 111565.
22. Habibi M, Habibi-Yangjeh A, Akinay Y, Khataee A. Oxygen vacancy-rich CeO₂ decorated with Cu₂BiS₃ nanoparticles: Outstanding visible-light photocatalytic performance towards tetracycline degradation. *Chemosphere*. 2023; 340: 139828. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139828.
23. Yigit A, Pinar PT, Akinay Y, et al. A novel electrochemical sensor based on a conducting polymer/carbon nanomaterial composite for sensitive determination of bisphenol A. *ChemistrySelect*. 2021; 6: 6302-6313. doi:10.1002/slct.202101316.

24. Debbarma J, Debnath R, Saha M. Carbon dots: Synthesis, properties and applications in sensing, bioimaging and drug delivery. *Lett Appl NanoBioSci*. 2023; 12: 115. doi:10.33263/LIANBS124.115.
25. Das I, Goel N, Gupta SK, Agrawal NR. A sensitive electrochemical sensor based on a molecularly imprinted polymer for bisphenol A determination. *J Electroanal Chem*. 2012; 670: 1-10. doi:10.1016/j.jelechem.2012.01.023.
26. Aoki K, Mukoyama I, Chen J. Theory of linear sweep voltammetry at microelectrodes with finite electron-transfer kinetics. *Russ J Electrochem*. 2004;40(3):280-285. doi:10.1023/B:RUEL.0000019665.59805.4C.
27. Tkach VV, Kushnir MV, de Oliveira SC, et al. Theoretical evaluation of an electrochemical sensor for bisphenol A based on a conducting polymer composite. *Lett Appl NanoBioSci*. 2025; 14: 47. doi:10.33263/LIANBS141.047.
28. Tkach VV, Kushnir MV, Storoshchuk NM, et al. Theoretical description of the electrochemical determination of bisphenol A on modified conducting polymer electrodes. *Rev Colomb Cienc Quim Farm*. 2023;52(3):608-619. doi:10.15446/rcciquifa.v52n3.112480.

Дата першого надходження статті до видання: 15.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОСТОРОВОЇ ВЕРИФІКАЦІЇ КЛЮЧОВИХ ТЕРИТОРІЙ ПРОЕКТОВАНОЇ ЕКОМЕРЕЖІ КІРОВОГРАДСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Дубровський В.Ю.¹, Мудрак О.В.²

¹Інститут агроекології і природокористування
Національної академії аграрних наук України
вул. Метрологічна, 12, 03143, м. Київ

²Комунальний заклад вищої освіти «Вінницька академія безперервної освіти»
вул. Грушевського, 13, 21100, м. Вінниця
viachesd@gmail.com

Статтю присвячено удосконаленню підходів до просторового моделювання регіональної екологічної мережі та створенню геоінформаційної системи для її цифрового представлення на прикладі Кіровоградської області. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю уточнення меж структурних елементів регіональних екологічних мереж із використанням сучасних геоінформаційних технологій та відкритих геопросторових даних. Метою роботи є просторова верифікація меж природних ядер регіональної екологічної мережі Кіровоградської області та розроблення геоінформаційної системи для інтегрованого зберігання, аналізу й візуалізації її структурних елементів. Дослідження виконано із використанням матеріалів Схеми екологічної мережі Кіровоградської області, відкритого набору даних Esri Land Cover, створеного на основі супутникових знімків Sentinel-2, даних про території природно-заповідного фонду, Смарагдової мережі та локалітети раритетних видів флори і фауни. У результаті дослідження сформовано актуалізований цифровий шар природних ядер, межі яких уточнено відповідно до сучасного поширення природних екосистем та узгоджено з межами існуючих природоохоронних територій. Загалом виділено 35 природних ядер, що становлять основу регіональної екологічної мережі області. На базі хмарної платформи ArcGIS Online створено геоінформаційну систему, яка об'єднує основні структурні елементи екологічної мережі, території природно-заповідного фонду, Смарагдової мережі та локалітети раритетних видів у єдиному інформаційному середовищі. Для кожного шару сформовано стандартизовані атрибутивні таблиці, що забезпечують ефективне зберігання, аналіз та оновлення просторових даних. Наукова новизна дослідження полягає у розробленні комплексного геоінформаційного підходу до просторової верифікації меж природних ядер із використанням сучасних відкритих даних про наземний покрив та створенні інформаційної моделі регіональної геоінформаційної системи екологічної мережі. Практичне значення роботи полягає у можливості використання створеної системи для підтримки природоохоронного менеджменту, просторового планування та подальшої цифровізації регіональних екологічних мереж України. *Ключові слова:* екологічна мережа, геоінформаційна система, геопортал, природні ядра, Кіровоградська область, природно-заповідний фонд.

Application of geoinformation technologies for spatial verification of key areas of the designed econetwork of Kirovograd region. Dubrovsky V., Mudrak O.

The article focuses on improving approaches to the spatial modelling of regional ecological networks and developing a geographic information system (GIS) for their digital representation, using Kirovograd region as a case study. The relevance of the research is determined by the need to refine the boundaries of regional ecological network structural elements through the application of modern geoinformation technologies and open geospatial datasets. The study aims to perform spatial verification of the core areas of the regional ecological network of Kirovograd region and to develop a GIS for the integrated storage, analysis, and visualization of its structural elements.

The research was based on the Regional Ecological Network Scheme of Kirovograd region, the open Esri Land Cover dataset derived from Sentinel-2 satellite imagery, spatial data on protected areas, Emerald Network sites, and occurrence records of rare flora and fauna species. As a result, an updated digital layer of ecological core areas was created, with their boundaries refined according to the current distribution of natural ecosystems and harmonized with the officially established boundaries of protected areas. In total, 31 ecological core areas were identified, forming the backbone of the regional ecological network.

A cloud-based geographic information system was developed using the ArcGIS Online platform. The system integrates the main structural elements of the ecological network, protected areas, Emerald Network sites, and occurrence localities of rare species within a unified geospatial environment. Standardized attribute tables were created for each thematic layer to ensure efficient storage, management, analysis, and updating of spatial information.



The scientific novelty of the study lies in the development of a comprehensive GIS-based approach to the spatial verification of ecological core area boundaries using contemporary open land cover datasets, as well as in the design of an information model for a regional ecological network GIS. The proposed system can serve as an effective decision-support tool for biodiversity conservation, environmental management, spatial planning, and the further digital transformation of regional ecological networks in Ukraine. *Key words:* ecological network, geographic information system, geoportal, ecological core areas, spatial analysis, Kirovohrad region, protected areas.

Вступ. Сучасна парадигма збалансованого природокористування та збереження біотичного і ландшафтного різноманіття вимагає переходу від ізольованої охорони окремих природно-заповідних об'єктів до розбудови цілісних просторових систем – екологічних мереж. На регіональному рівні формування таких структур стикається із низкою геоекологічних і геоінформаційних викликів. Традиційні картографічні матеріали і регіональні схеми екологічних мереж, розроблені у попередні десятиліття, зазвичай, існують у статичному аналоговому форматі або у вигляді розрізнених векторних шарів без єдиної топологічної структури. Це унеможливує оперативний екологічний моніторинг трансформації угідь, ускладнює прийняття управлінських рішень у сфері просторового планування і не дозволяє інтегрувати природоохоронні дані у сучасні геоінформаційні системи (ГІС) органів державної влади та територіальних громад. Потреба у подоланні розриву між теоретичним проектуванням екомереж та їх практичним динамічним веденням зумовлює необхідність створення інтерактивних веб-орієнтованих геопорталів.

Актуальність дослідження зумовлена специфікою геоекологічної ситуації у Кіровоградській області. Унікальність регіону полягає в його екотонному розміщенні на межі двох природних зон: лісостепова частина області охоплює Подільсько-Придніпровський край, а степова – Дністровсько-Дніпровську північностепову провінцію [1], що забезпечує високу ландшафтну диференціацію та визначає її високий природний біоенергетичний потенціал. Водночас область є одним із найбільш антропогенно трансформованих регіонів України: рівень розораності території перевищує 70%, а частка лісистості історично є критично низькою і ледь сягає 4–5% [2]. За умов тотального домінування агроландшафтів природні біоцентри (ядра) і екокоридори зазнають постійного антропогенного тиску, деградації і фрагментації. Рішенням обласної ради від 23 червня 2017 року № 329 затверджена регіональна схема екологічної мережі Кіровоградської області, яка нараховує 99 регіональних центрів біорізноманіття і 186 екологічних коридорів (рис. 1) [3].



Рис. 1. Регіональна схема екомережі Кіровоградської області

Джерело: Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Кіровоградській області у 2024 р.

Проте за минулий час відбулися суттєві зміни у структурі землекористування, деградація малих річок та інтенсифікація ведення сільського господарства. У зв'язку з цим виникає гостра практична і наукова потреба у просторовій верифікації меж елементів екомережі за допомогою сучасних даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та впровадженні інтерактивного геопорталу як інструменту моніторингу і захисту цих територій від нелегального розорювання в умовах децентралізації та зміни меж адміністративних районів. На рисунку 2 представлено проєкт екологічної мережі Кіровоградської області (2024), де виділено структурні елементи.

1. *Екокоридори*. Національні: Дніпровський, Галицько-Слобожанський і Південно-Бузький. Регіональний: 1Гр Синицький (р. Синиця), 2Гр Ятранський (р. Ятрань), 3Гр Синюський (р. Синюха), 4Гр Яланецький (р. Яланець), 5Гр Окнівський (р. Окна), 1Нр Великовиський (р. Велика Вись), 2Нр Чортоташлицький (р. Чорний Ташлик), 3Нр Синюський (р. Синюха), 1Кр Інгульський (р. Інгул), 2Кр Тясминичко-Інгульський (р. Тясмин, р. Інгул), 3Кр Сугокліівський (р. Сугокліівка), 4Кр Аджамський (р. Аджамка), 5Кр Інгулецький (р. Інгулець), 1Ор Цибульський, 2Ор Інгулецький (р. Інгулець), 3Ор Омеляницький (р. Омеляник), 4Ор Кам'янський (р. Кам'янка). Регіональний: 1Гр Синицький (р. Синиця), 2Гр Ятранський (р. Ятрань), 3Гр Синюський (р. Синюха), 4Гр Яланецький (р. Яланець), 5Гр Окнівський (р. Окна), 1Нр Великовиський (р. Велика Вись), 2Нр Чортоташлицький

(р. Чорний Ташлик), 3Нр Синюський (р. Синюха), 1Кр Інгульський (р. Інгул), 2Кр Тясминичко-Інгульський (р. Тясмин, р. Інгул), 3Кр Сугокліівський (р. Сугокліівка), 4Кр Аджамський (р. Аджамка), 5Кр Інгулецький (р. Інгулець), 1Ор Цибульський, 2Ор Інгулецький (р. Інгулець), 3Ор Омеляницький (р. Омеляник), 4Ор Кам'янський (р. Кам'янка).

2. *Природні ядра*. Голованівський район: 1Яд-Гр Бандурівські ставки, 2Гр-Гардова, 3Гр-Кам'яногірське (Кам'яногірська), 4Гр-Сальківське-Казавчинське, 5Гр-Зелена Брама, 6Гр-Когутівка, 7Гр-Голованівське (Голоче), 8Гр-Чортоташлицьке, 9Гр-Соломія (на захід від с. Соломія). Новоукраїнський район: 1Яд-Нр Великовиське, 2Яд-Нр Войнівське, 3Яд-Нр Новомиргородське, 4Яд-Нр Карпенків край, 5Яд-Нр Каскади. Кропивницький район: 1Яд-Кр Миколаївсько-Нерубайлівське, 2Яд-Кр Чорноліське, 3Яд-Кр РЛП «Боковенківський ім. М.Л. Давидова», 4Яд-Кр Садківський степ, 5Яд-Кр Монастирище, 6Яд-Кр Бобринецьке, 7Яд-Кр Шумок-Грузьке, 8Яд-Кр Полозова балка, 9Яд-Кр Братерське, 10Яд-Кр Сухо-Балківське, 11Яд-Кр Лебединівсько-Глибоке. Олександрійський район: 1Яд-Ор РЛП Світловодський, 2Яд-Ор Бандурівське, 3Яд-Ор Дерев'яне, 4Яд-Ор Вишнівецько-Лозуватське, 5Яд-Ор Лікарівсько-Березівське, 6Яд-Ор Світловодсько-Білецьківське, 7Яд-Ор Бузівське, 8Яд-Ор Михалівсько-Балахівське, 9Яд-Ор Петрівське, 10Яд-Ор Ганівське.

3. *Буферна зона*: 1Бз-Нр біля геологічної пам'ятки природи місцевого значення «Каскади» (Злинська ТГ).

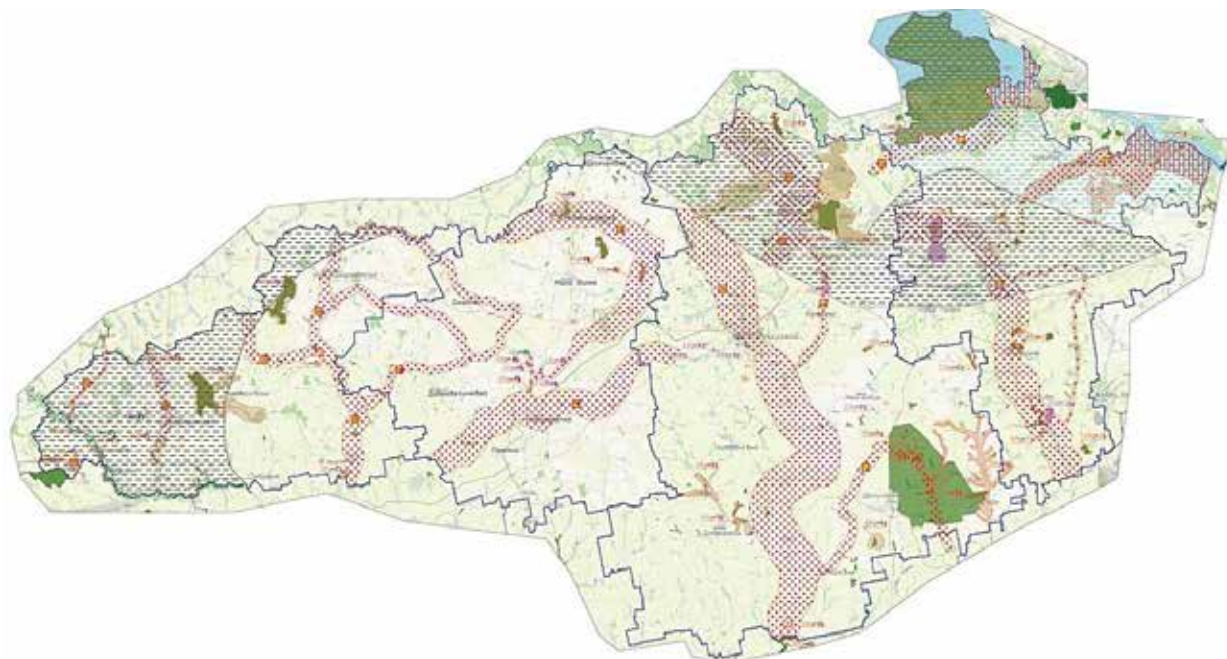


Рис. 2. Проєкт екомережі Кіровоградської області (2024)

Джерело: Матеріали розробки проєкту екологічної мережі Кіровоградської області Департаменту екології та природних ресурсів Кіровоградської ОДА

4. *Відновлювальні території*: Олександрійський район: 1Вд-Ор біля з-ка Бандурівський (Морозівський буровугільний розріз, Байдурівський буровугільний розріз), 2Вд-Ор Костянтинівський буровугільний розріз (недіючий вугільний кар'єр поблизу сіл Березівка і Ягідне, 3Вд-Ор Петрівське родовище графітових руд ділянка Власівська. Новоукраїнський район: 1Вд-Нр Войнівський кар'єр (ВАТ Войнівський кар'єр). Розташований на північний схід від с. Нова Павлівка; 2Вд-Нр Капустинський кар'єр (ВАТ Капустинський блоковий кар'єр) розташований на південь від с. Михайлівка; 3Вд-Нр Анастасіївське родовище (ТОВ Ноксен-Анастасіївське родовище); 4Вд-Нр Перлівське родовище гранітів розташоване на відстані близько 2,5 км на північний схід від с. Войнівка; 5Вд-Нр Бантишівське родовище монцоніту. Кропивницький район: 1Вд-Кр Крупський кар'єр (ВАТ Крупський кар'єр) розташований на схід від с. Карлівка; 2Вд-Кр Соколівське родовище (м. Кропивницький Соколівське родовище гранітів), знаходиться поблизу Кропивницького, на правому березі р. Сугоклія (притока Інгулу, бас.Південного Бугу); 3Вд-Кр Суботцівське (Знам'янське) родовище гранітів, знаходиться за 0,5 км на південний схід від околиці с. Суботці; 4 Вд-Кр Новопавлівське родовище гранітів розташоване на схід від с. Нова Павлівка; 5Вд-Кр Новгородківське родовище гранітів розташоване на південь від смт Новгородка. Голованівський район: 1Вд-Гр Гайворонське родовище мігматитів, розташоване неподалік смт. Гайворон (захід).

Означене дослідження безпосередньо пов'язане із реалізацією Закону України «Про екологічну мережу України» [4], Стратегії біобезпеки та біологічного захисту [5], а також із виконанням вимог Бернської конвенції щодо розбудови Смарагдової мережі (Emerald Network) [6]. Практична реалізація дослідження інтегрується у завдання просторового планування території Кіровоградської області, зокрема розроблення комплексних планів просторового розвитку територіальних громад [7]. Створена нами геоінформаційна система (ГІС) забезпечує інформаційну підтримку державної стратегії регіонального розвитку в частині збереження біотичного і ландшафтного різноманіття та екологічної стабілізації агроландшафтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій свідчить, що теоретичні і методологічні засади формування національної та регіональних екологічних мереж України були закладені у фундаментальних працях Шеляг-Сосонка Ю.Р., Гродзинського М.Д., Романенка В.Д. (2004 [8]), Шеляг-Сосонка Ю.Р., Ткаченка В.П., Андрієнка Т.Л., Мовчана Я.І. (2005 [9]) і інших, у яких обґрунтовано принципи структурної організації екомережі, критерії виділення ключових, сполучних, буферних і відновлювальних територій. Подальший розвиток

біоекологічного і ландшафтно-екологічного підходів відображено у дослідженнях Стойка С.М. (1999) [10], Мудрака О.В. (2012) [11], Іваненка Є.І. (2013) [12], Топчієва О.Г., Сича В. (2020) [13], Мудрака О.В., Мудрак Г.В. (2020, 2021) [14-15] у яких розкрито питання репрезентативності природних комплексів, ролі територій природно-заповідного фонду (ПЗФ) у формуванні екомережі та науково-методичних засад виділення її структурних елементів.

Комплексний аналіз особливостей формування екологічної мережі лісостепової зони України подано у монографії Бащенко М.І. і співавторів (2009) «Екологічна мережа Центрального Придніпров'я» [16], де узагальнено підходи до проєктування регіональних екомереж та визначено перспективи їх розвитку. Особливості формування екологічної мережі в умовах значної антропогенної трансформації ландшафтів Центральної України досліджував Домаранський А.В. (2004) [17]. Питання включення антропогенно-природних територій до складу регіональної екомережі Кіровоградської області та використання деградованих земель як перспективних природоохоронних територій висвітлено у працях Зарубіної А.В. (2016) [18]. Значення захисних лісових насаджень як структурних елементів екомережі Кіровоградської області обґрунтовано у роботах Гетьмана П.А. (2023) [19].

Сучасний етап розвитку досліджень характеризується широким використанням ГІС-технологій. Методологічні засади геоінформаційного аналізу, цифрового картографування і просторового моделювання екомереж розроблено Самойленком В.М. та Корогодою Н.П. (2013) [20]. Питання створення баз геопросторових даних природоохоронного призначення досліджує Кирилюк М.О. (2021) [21], Дубровським В.Ю. і Дем'янюк О.С. (2025) [22] розроблено базу даних для структурних елементів екологічної мережі Центрального Придніпров'я у геоінформаційній програмі QGIS, тоді як практичні аспекти застосування веб-ГІС і платформи ArcGIS Online для представлення регіональних екологічних мереж висвітлено у дисертаційному дослідженні Теслович М.В. (2024) [23].

Окрему групу сучасних досліджень становлять праці, присвячені формуванню Смарагдової мережі України та інтеграції національної екологічної мережі до Всеєвропейської екомережі, у яких із використанням ГІС-технологій обґрунтовано підходи до виділення територій особливого природоохоронного значення відповідно до вимог Бернської конвенції.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених формуванню екологічної мережі України, низка важливих аспектів залишається недостатньо опрацьованою. Більшість існуючих методик проєктування регіональних екологічних мереж ґрунтується на використанні територій

ПЗФ, матеріалів традиційного картографування та експертного визначення меж структурних елементів. Водночас сучасні можливості ГІС-технологій, ДЗЗ та відкритих просторових даних поки що недостатньо інтегровані у практику проєктування і уточнення регіональних екомереж.

Особливо актуальною ця проблема є для Кіровоградської області, де, попри затвердження Регіональної схеми екологічної мережі, значна частина її проєктних структурних елементів, насамперед, природних ядер та екологічних коридорів, не має чітко визначених, просторово верифікованих і юридично закріплених меж. Перенесення аналогових картографічних матеріалів у цифрове геоінформаційне середовище супроводжується геометричними похибками та невідповідністю між проєктними межами і сучасною структурою землекористування.

Крім того, дотепер практично не застосовувався комплексний підхід, який би поєднував дані регіональної схеми екологічної мережі з актуальними відкритими растровими моделями наземного покриву високої роздільної здатності, матеріалами дистанційного зондування Землі, відомостями про локалітети раритетних видів флори і фауни [24, 25] та сучасними засобами геоінформаційного аналізу в межах єдиного цифрового середовища. Недостатньо дослідженими залишаються також питання створення відкритих геоінформаційних ресурсів для інтегрованого представлення, аналізу і актуалізації структурних елементів регіональної екомережі.

Саме вирішенню зазначених проблем присвячена ця стаття, у якій запропоновано підхід до просторової верифікації меж ключових територій (природних ядер, біоцентрів) регіональної екомережі Кіровоградської області із застосуванням сучасних відкритих даних про наземний покрив, геоінформаційного моделювання та обґрунтовано архітектуру відкритої ГІС для інтегрованого відображення основних і допоміжних структурних елементів екологічної мережі.

Наукова новизна дослідження полягає у вдосконаленні підходів до просторового моделювання регіональної екомережі шляхом комплексного використання сучасних відкритих геопросторових даних і ГІС-технологій. Уперше для Кіровоградської області здійснено просторову верифікацію меж природних ядер регіональної екомережі із застосуванням відкритих растрових моделей наземного покриву, матеріалів ДЗЗ та геоінформаційного аналізу. Удосконалено методичний підхід до уточнення меж структурних елементів екологічної мережі шляхом інтеграції даних про сучасний наземний покрив, території ПЗФ, локалітети раритетних видів флори і фауни та інших природоохоронно цінних територій у єдиному геоінформаційному середовищі. Подальшого розвитку набули підходи до цифрового представлення регіональної екомережі через створення відкритої ГІС, яка забезпечує інтегроване

відображення, аналіз і подальшу актуалізацію її структурних елементів.

Методологічне значення дослідження полягає у розробленні комплексного геоінформаційного підходу до актуалізації, просторового моделювання та цифрового представлення структурних елементів регіональної екологічної мережі на основі інтеграції традиційних картографічних матеріалів із сучасними відкритими геопросторовими даними. На відміну від існуючих підходів, що переважно ґрунтуються на використанні аналогових картографічних матеріалів та експертному визначенні меж структурних елементів, запропонована методика передбачає комплексне використання матеріалів Схеми проєкту екологічної мережі Кіровоградської області (2024), даних ДЗЗ, глобальних та актуальних моделей наземного покриву Esri Land Cover за 2025 рік [26], офіційних геопросторових даних територій ПЗФ [27] та сучасних засобів геоінформаційного аналізу.

Методичний підхід базується на формуванні єдиного цифрового геоінформаційного середовища, у якому всі структурні елементи регіональної екологічної мережі представлені у вигляді взаємопов'язаних векторних шарів. Основою цифрової моделі стали структурні елементи, визначені відповідно до Схеми проєкту екологічної мережі Кіровоградської області (2024). Для всіх основних елементів екомережі: ключових (природних ядер), сполучних, буферних і відновлюваних територій, – виконано геоприв'язку, векторизацію та створення цифрових просторових шарів. Межі природних ядер додатково уточнено шляхом аналізу сучасного наземного покриву, просторової зв'язності природних екосистем, врахування офіційних меж територій та об'єктів ПЗФ і візуальної верифікації за деталізованими супутниковими знімками. Такий підхід забезпечує можливість регулярної актуалізації просторових меж структурних елементів відповідно до сучасного стану природних екосистем.

Практичним результатом реалізації запропонованої методики стало створення геоінформаційної системи екологічної мережі Кіровоградської області на базі хмарної ГІС-платформи ArcGIS Online.

Запропонований методичний підхід може бути використаний як основа для створення сучасних цифрових ГІС регіональних екологічних мереж, інтеграції їх до системи просторового планування територій, здійснення моніторингу стану природних екосистем, а також прийняття управлінських рішень у сфері охорони навколишнього природного середовища і збереження біорізноманіття.

Результати дослідження. У результаті застосування запропонованого геоінформаційного підходу сформовано цифрову модель регіональної екологічної мережі Кіровоградської області та створено геоінформаційну систему на базі хмарної платформи ArcGIS Online [28]. На відміну від традиційних картографічних матеріалів, система забезпечує центра-

лізоване зберігання, просторовий аналіз, оновлення і вебвізуалізацію геоданих, що дозволяє використовувати її як інструмент підтримки природоохоронного управління та просторового планування.

Структура геоінформаційної системи побудована за модульним принципом і включає основні і допоміжні інформаційні шари (рис. 3).

До основних шарів належать ключові, сполучні, буферні і відновлювані території, які відображають територіальну структуру регіональної екомережі. Допоміжні шари представлені територіями і об'єктами ПЗФ, територіями Смарагдової мережі, локалітетами раритетних видів рослин і тварин. Така побудова забезпечує комплексне відображення не лише її структурних елементів, а й природоохоронних об'єктів, що формують її екологічну основу.

Для кожного інформаційного шару сформовано стандартизовані атрибутивні таблиці. Атрибутивна інформація основних структурних елементів містить назву, адміністративний район, територіальну громаду, площу, а для природних ядер та екологічних коридорів також їх функціональне значення і перелік природоохоронних територій, що входять до їх складу (рис. 4).

Атрибутивні таблиці допоміжних шарів містять інформацію про категорію природоохоронного

об'єкта, його статус, площу, адміністративне розташування, а для територій Смарагдової мережі – офіційний код, типи оселищ і перелік охоронюваних видів відповідно до вимог Бернської конвенції. Така структура забезпечує інтегроване зберігання просторової та семантичної інформації і дозволяє виконувати багатокритеріальний просторовий аналіз.

Геоінформаційна система сформована на основі інтеграції різномірних геопросторових даних, які відрізняються за типом, джерелом походження, просторовою роздільною здатністю та функціональним призначенням. Основою для створення шарів структурних елементів екологічної мережі слугували матеріали Схеми проєкту екологічної мережі Кіровоградської області (2024), які були геоприв'язані і векторизовані. Для їх актуалізації використано сучасні відкриті дані дистанційного зондування Землі, зокрема глобальний набір Esri Sentinel-2 Land Use/Land Cover 2025 року, космічні знімки високої просторової роздільної здатності сервісу Google Earth [29], а також дані про зміни деревного покриву Global Forest Watch [30]. Використання кількох незалежних джерел інформації забезпечило можливість просторової верифікації меж структурних елементів та підвищення достовірності їх картографічного відображення.

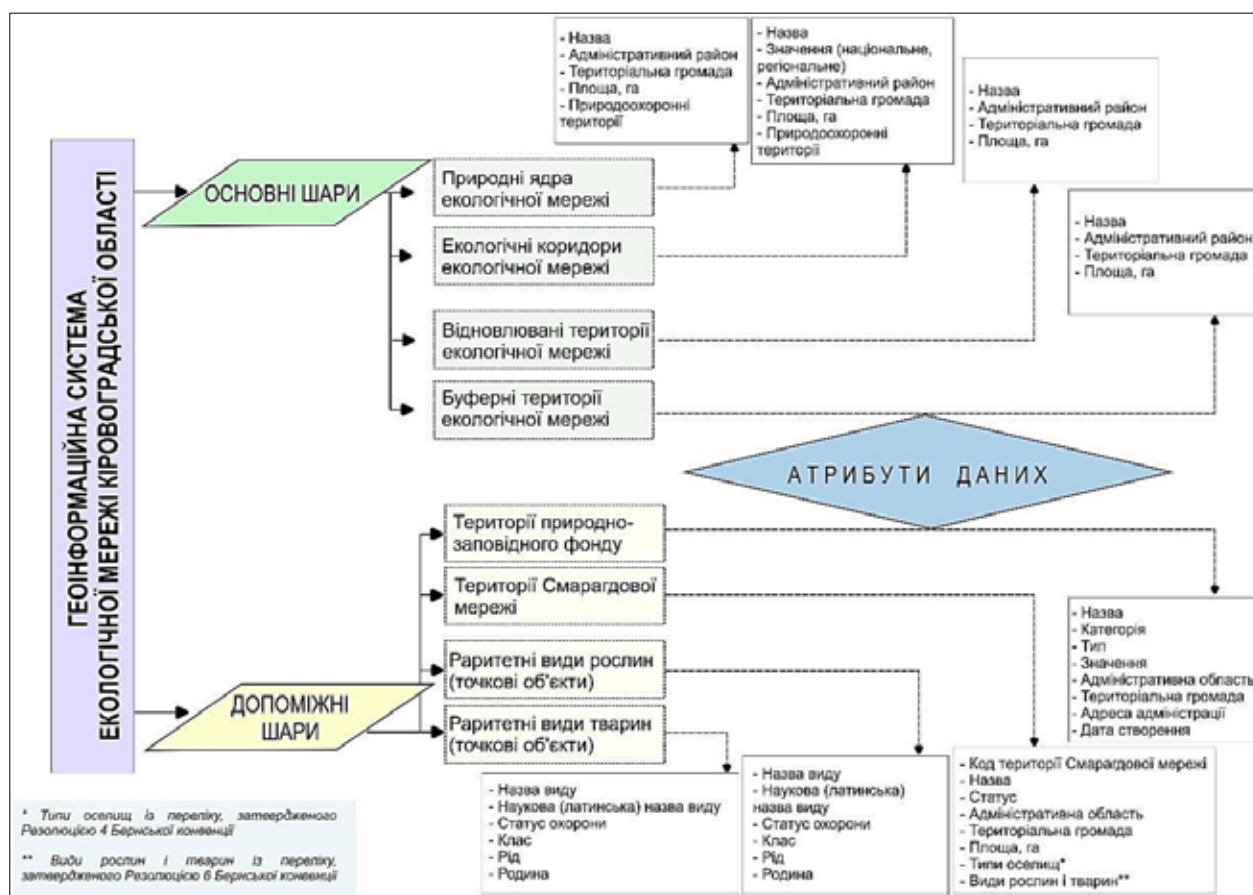


Рис. 3. Структура геоінформаційної системи регіональної екологічної мережі Кіровоградської області

Допоміжні інформаційні шари сформовано на основі офіційних відкритих геопросторових ресурсів. Застосування стандартизованих відкритих наборів даних забезпечує можливість регулярного оновлення геоінформаційної системи, її масштабування та використання як інформаційної основи для моніторингу стану екомережі, підтримки природоохоронного планування і прийняття управлінських рішень (табл. 1).

Базовим елементом створеної геоінформаційної системи є шар природних ядер, сформований відповідно до затвердженої Схеми екологічної мережі Кіровоградської області та уточнений за результатами просторового аналізу. До його складу включено 35 природних ядер, розташованих у межах усіх чотирьох адміністративних районів області.

Найбільші за площею природні ядра зосереджені переважно у центральній та південній частинах області. Серед них виділяються регіональний ландшафтний парк (РЛП) «Світловодський» (61 274 га), РЛП «Боковеньківський ім. М.Л. Давидова» (40 857 га), «Голованівське» (7 613 га), «Миколаївсько-Нерубайлівське» (7 607 га) і «Чорноліське» (7 456 га) урочища. Саме вони утворюють основу регіонального екологічного каркасу та забезпечують збереження найбільших масивів природних екосистем області.

Аналіз атрибутивної бази даних показав, що переважна більшість природних ядер сформована на основі існуючих територій ПЗФ різних категорій. До їх складу входять регіональні ландшафтні парки, заказники загальнодержавного і місцевого значення, заповідні урочища, ботанічні, геологічні, гідрологічні та зоологічні пам'ятки природи. Найвищою

концентрацією заповідних об'єктів характеризуються природні ядра РЛП «Боковеньківський ім. М.Л. Давидова», «Світловодський» і «Чорноліське» урочище, що підтверджує їх визначальне значення для підтримання екологічної стійкості регіону.

Водночас результати дослідження засвідчили, що окремі природні ядра, зокрема «Соломія», «Братерське», не містять у своїх межах територій ПЗФ, але є частково «Світловодсько-Білецьківське». Це свідчить про наявність природних комплексів, які поки що не мають офіційного природоохоронного статусу, однак можуть розглядатися як перспективні території для подальшого заповідання та розширення ПЗФ області.

Запропонована інформаційна модель геоінформаційної системи забезпечує логічний взаємозв'язок між усіма тематичними шарами, що дозволяє виконувати комплексний аналіз територіальної структури екологічної мережі, оцінювати репрезентативність природоохоронних територій, аналізувати поширення раритетних видів, визначати пріоритетні напрями розвитку регіональної екологічної мережі та оперативно актуалізувати просторові дані. Використання платформи ArcGIS Online забезпечує відкритий доступ до геоінформаційних ресурсів, можливість їх подальшого оновлення та інтеграції із системами просторового планування, що значно розширює практичні можливості використання розробленої геоінформаційної системи.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено геоінформаційний підхід до актуалізації та цифрового представлення регіональної екологічної мережі Кіровоградської області, що базується на інтеграції матеріалів Схеми еко-

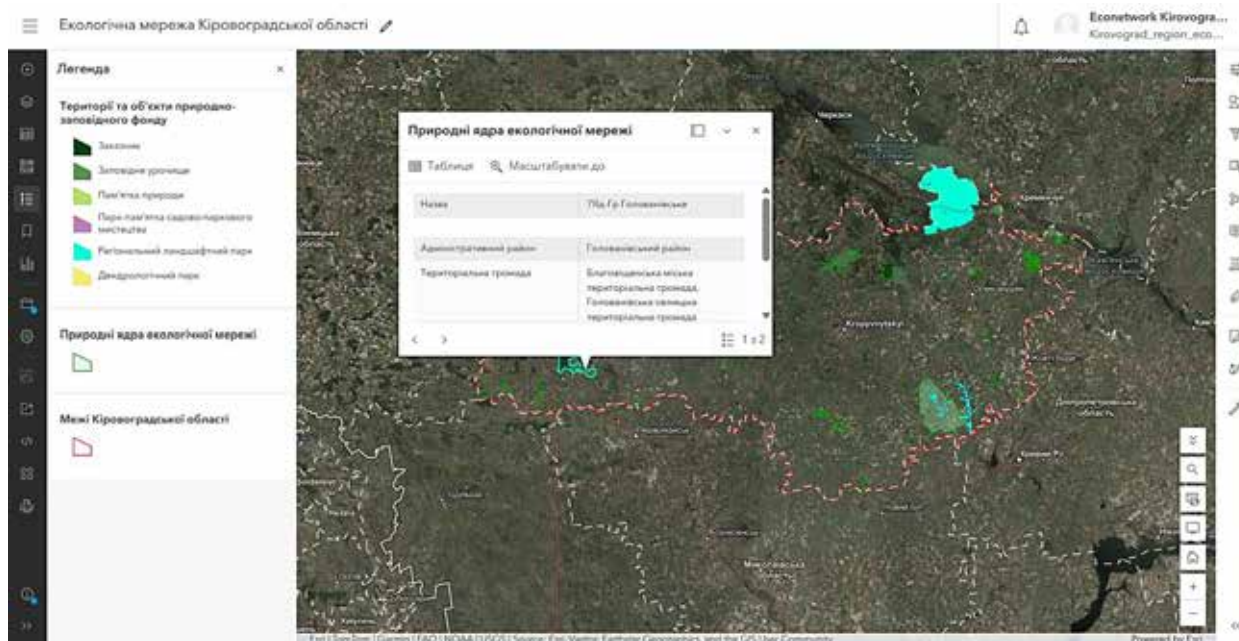


Рис. 4. Відображення природних ядер геоінформаційної системи екологічної мережі Кіровоградської області

Таблиця 1

Структура геопросторових даних геоінформаційної системи екомережі Кіровоградської області

Шар геоінформаційної системи	Назва геопросторових даних	Тип	Джерело/авторство
Основні шари геоінформаційної системи			
Ключові території (природні ядра, біоцентри)	Схема екомережі Кіровоградської області	Скановане зображення 1:100 000	Схема проекту екологічної мережі Кіровоградської області (2024)
	Sentinel-2 Land Use/Land Cover 2025	Растр 10×10 м	https://livingatlas.arcgis.com Дата звернення: 08.07.2026 [28]
	Космозображення сервісу Google (CNES / Airbus)	Растр 5×5 м	:https://earth.google.com/web Дата звернення: 10.06.2026 [29]
Сполучні території (екологічні коридори)	Схема екомережі Кіровоградської області	Скановане зображення 1:100 000	Схема проекту екологічної мережі Кіровоградської області (2024)
	Гідрографічна мережа	Векторні (лінії) Векторні (полігони)	https://www.openstreetmap.org Дата звернення: 01.07.2026
Відновлювані території	Схема екомережі Кіровоградської області	Скановане зображення 1:100 000	Схема проекту екологічної мережі Кіровоградської області (2024)
	Ділянки масової втрати деревного покриву протягом 2001-2022 років (Areas of gross tree cover loss)	Растр, 30×30 м	https://www.globalforestwatch.org Дата звернення: 18.06.2026 [29]
Буферні території	Схема екомережі Кіровоградської області	Скановане зображення 1:100 000	Схема проекту екологічної мережі Кіровоградської області (2024)
	Sentinel-2 Land Use/Land Cover	Растр 10×10 м	https://livingatlas.arcgis.com Дата звернення: 08.07.2026 [26]
Допоміжні шари геоінформаційної системи			
Території природно-заповідного фонду		Векторні (полігони)	https://land.gov.ua Дата звернення: 11.02.2022 [27]
Території Смарагдової мережі		Векторні (полігони)	https://emerald.eea.europa.eu Дата звернення: 08.07.2026 [6]
Раритетні види рослин	Фактичні знахідки представників видів рослинного та тваринного світу або сліди їх перебування	Векторні (точки)	https://www.gbif.org/species/1 (date of access: 08.07.2026) [24]
Раритетні види тварин			https://www.inaturalist.org Date of access: 08.07.2026 [25]

логічної мережі області із сучасними відкритими геопросторовими даними. Виконано просторову верифікацію меж природних ядер із використанням даних Esri Land Cover, територій ПЗФ та матеріалів ДЗЗ, що дало змогу підвищити точність зображення їх сучасної конфігурації. На базі платформи ArcGIS Online створено геоінформаційну систему, яка об'єднує структурні елементи екологічної мережі, територій ПЗФ, Смарагдової мережі

та локалітети раритетних видів у єдиному інформаційному середовищі. Запропонована інформаційна модель забезпечує ефективне зберігання, аналіз, візуалізацію та актуалізацію просторових даних і може бути використана як основа для цифровізації регіональних екологічних мереж інших областей України, а також для інформаційного забезпечення природоохоронного менеджменту та просторового планування.

Література

- Фізико-географічне районування: карта М 1:2 500 000 / О.М. Маринич, В.М. Пащенко, О.М. Петренко, П.Г. Шищенко. Національний атлас України. Київ: ДНВП «Картографія», 2007. С. 228–229.
- Волинець О. Антропогенний ландшафт Кіровоградської області. Наука. Освіта. Молодь : матеріали Всеукраїнської студентської наукової конференції (Умань, 2015). Ч. 1. С. 51–52. URL: <https://surl.li/vtfvqs> (дата звернення: 08.07.2026).

5. Про затвердження регіональної схеми екологічної мережі Кіровоградської області: рішення Кіровоградської обласної ради від 30.06.2017 р. № 313. URL: <https://oblrada.kr.ua/decission/2151/pro-zatverdzhennya-regionalnoi-shemi-ekologichnoi-merezhikirovogradskoi-oblasti-30-06-2017> (дата звернення: 08.07.2026).
6. Про екологічну мережу України: Закон України від 24.06.2004 р. № 1864-IV: станом на 6 черв. 2026 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1864-15#Text> (дата звернення: 06.06.2026).
7. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 15 жовтня 2021 року «Про Стратегію біобезпеки та біологічного захисту»: Указ Президента України від 17.12.2021 р. № 668/2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/668/2021#Text> (дата звернення: 08.07.2026).
8. Emerald Network – General Viewer. ArcGIS Web Application. URL: <https://emerald.eea.europa.eu/> (date of access: 17.06.2026).
9. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо планування використання земель : Закон України від 17.06.2020 р. № 711-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/711-20> (дата звернення: 08.07.2026).
10. Шеляг-Сосонко Ю.Р., Гродзинський М.Д., Романенко В.Д. Концепція, методи та критерії створення екомережі України. Київ: Фітосоціоцентр, 2004. 143 с.
11. Шеляг-Сосонко Ю.Р., Ткаченко В.С., Андрієнко Т.Л., Мовчан Я.І. Екомережа України та її природні ядра. *Український ботанічний журнал*. 2005. Т. 62. № 2. С. 142–158.
12. Стойко С. Екологічна стратегія функціонування біосферних резерватів в Україні та підвищення репрезентативності їх мережі. *Український ботанічний журнал*. 1999. Т. 56. № 1. С. 89–95.
13. Мудрак О.В. Збалансований розвиток екомережі Поділля: стан, проблеми, перспективи [Монографія]. Вінниця: “СПД Главацька Р.В.”. 2012. 914 с.
14. Іваненко Є.І. Аналіз розміщення природно-заповідного фонду України: підхід, стан, проблеми. *Український географічний журнал*. 2013. № 3. С. 64–69.
15. Топчієв О., Сич В. Проблеми кластеризації та структурування соціоприродних видів господарської діяльності у географічних дослідженнях. *Український географічний журнал*. 2020. Т. 2, № 110. С. 65–72. URL: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.02.065> (дата звернення: 08.07.2026).
16. Мудрак О.В., Мудрак Г.В. Заповідна справа: навч. посіб. для студентів галузі знань 10 “Природничі науки”. Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 640 с.
17. Мудрак О.В., Мудрак Г.В., Щерблюк А.Л. Науково-методичні і практичні засади оцінювання ключових територій екомережі Східного Поділля за основними критеріями їх формування. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2021. № 28. С. 77-91. DOI: 10.31481/uhmj.28.2021.07
18. Екологічна мережа Центрального Придніпров'я: монографія / М. І. Башенко та ін. Київ: Центр екол. освіти та інформації. 2009. 386 с.
19. Домаранський А.О. Концепція ландшафтного різноманіття в контексті формування національної екомережі. *Україна: географічні проблеми сталого розвитку*: зб. наук. праць: у 4 т. Київ: ВГЛ «Обрії», 2004. Т. 2. С. 82–84.
20. Зарубіна А. Антропогенно-природні об'єкти та території в екомережі Кіровоградської області. *Українська географія: сучасні виклики*: зб. наук. пр. у 3-х т. 2-ге вид. Київ, 2016. С. 363.
21. Гетьман П.А. Захисні лісові смуги – невід'ємна складова регіональної екомережі (Кіровоградська область). *Чорноморський ботанічний журнал*. 2023. Т. 19, № 4. С. 368–377. URL: <https://doi.org/10.32999/ksu1990-553X/2023-19-4-3> (дата звернення: 08.07.2026).
22. Самойленко В.М., Корогода Н.П. Регіональні та локальні екомережі: підручник. Київ: Логос, 2013. 192 с.
23. Кирилюк М.О. Проектування бази даних інтерактивного атласу об'єктів природно-заповідного фонду України. *Український географічний журнал*. 2021. № 4. С. 57–65. URL: <https://doi.org/10.15407/ugz2021.04.057> (дата звернення: 08.07.2026).
24. Дубровський В., Дем'янюк О. Геоінформаційна система екологічної мережі Центрального Придніпров'я. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 5(154). С. 85–93.
25. Теслович М.В. Екологічна мережа Закарпатської області: територіальна структура, функціонування, оптимізація: дис. д-ра філос.: 103 Науки про Землю / Львівський національний університет імені Івана Франка. Львів, 2024. 291 с.
26. Animalia. GBIF. URL: <https://www.gbif.org/species/1> (date of access: 08.07.2026).
27. iNaturalist. iNaturalist. URL: <https://www.inaturalist.org/> (date of access: 08.07.2026).
28. Esri. Sentinel-2 Land Cover Explorer 2025. *Redirect*. URL: <https://livingatlas.arcgis.com> (date of access: 08.07.2026).
29. Державна служба України з питань геодезії, картографії та кадастру – Офіційний веб-сайт. URL: <https://land.gov.ua/> (дата звернення: 11.06.2026).
30. Map Viewer. ArcGIS Online. URL: <https://www.arcgis.com/apps/mapviewer/index.html> (date of access: 19.06.2026).
31. Google Earth. *Google Earth*. URL: <https://earth.google.com/web> (date of access: 08.07.2026).
32. Forest Monitoring, Land Use & Deforestation Trends. *Forest Monitoring*. URL: <https://www.globalforestwatch.org> (date of access: 08.07.2026).
33. Цимбалюк К. Вплив військового конфлікту на екологічний стан водних ресурсів України. *Екологічний вісник*. 2024 № 18. С. 10. DOI: 10.18372/2786-8168.18.18537.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

БІОХІМІЧНИЙ СКЛАД ФІТОСИРОВИНИ ОДНОРІЧНИХ І БАГАТОРІЧНИХ РОСЛИН-ІНТРОДУЦЕНТІВ РОДИНИ *ASTERACEAE* В УМОВАХ ПОЛІССЯ УКРАЇНИ

Іващенко І.В.¹, Рахметов Д.Б.²¹Поліський національний університет
Старий бульв., 7, 10008, м. Житомир²Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка
Національної академії наук України
вул. Тімірязєвська, 1, 01014, м. Київ
kalateja@ukr.net

В умовах глобальних змін клімату інтродукція високопродуктивних, екологічно пластичних, видів рослин набуває все більшого значення. Досить цінними лікарськими, харчовими, ефіроолійними, декоративними, медоносними рослинами є представники родини *Asteraceae*, які мають високу стійкість до несприятливих умов середовища, продуктивність та якісні показники. Предметом досліджень слугували рослини родини *Asteraceae* : *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus*. Насінний та посадковий матеріал отримано із відділу культурної флори Національного ботанічного саду (НБС) імені М. М. Гришка НАН України. Інтродукційні дослідження проводили на експериментальних ділянках ботанічного саду імені Героїв десантників Поліського національного університету, який розташований у зоні Полісся України, упродовж 2013–2024 рр. Біохімічний аналіз фітосировини здійснювали у біохімічній лабораторії відділу культурної флори НБС імені М. М. Гришка НАН України. Сировину збирали у фазу цвітіння. Для біохімічного аналізу використовували надземну частину рослин. Вивчено кількісний і якісний склад основних компонентів рослинної сировини малопоширених рослин-інтродуцентів родини *Asteraceae* за умов культивування в зоні Центрального Полісся України. Серед колекції лікарських, ароматичних рослин родини *Asteraceae* найвищий вміст біологічно активних речовин у надземній частині рослин у фазу цвітіння встановлено у видів : *H. aromaticum*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *S. coronata*. Значним вмістом аскорбінової кислоти вирізнялись *H. aromaticum* (267,22±81,14 мг %), *G. coronaria* var. *discolor* (235,79±61,37 мг%), *G. coronaria* var. *coronaria* (172±34,44 мг%), *S. coronata* (208,05±113,21 мг%). Найвищі показники вмісту каротину, загальних цукрів зафіксовано у сировині *G. coronaria* var. *discolor* (2,94±1,40 мг%; 17,48±1,78 %, відповідно), *G. coronaria* var. *coronaria* (2,69±1,56 мг%; 17,45±1,46 %, відповідно). Максимальна кислотність відзначена для рослин *G. coronaria* var. *discolor* (4,83±3,48 %), максимальний вміст кальцію – у *S. coronata* (1,51±0,79 %). Сировина інтродуцентів роду *Artemisia* вирізнялась значним вмістом дубильних речовин: *A. austriaca* (8,66±5,17 %), *A. dracunculus* f 2 (8,48±0,95 %), *A. abrotanum* f 2 (8,23±2,92 %). Максимальну кількість фосфору накопичували рослини *A. abrotanum* f 1 (0,286±0,242 %). Отримані результати свідчать, що досліджувані види рослин родини *Asteraceae* цінні інтродуценти, сировина яких вирізняється широким спектром біологічно активних речовин. *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus* – перспективні рослини для культивування в зоні Центрального Полісся з метою використання у харчовій промисловості, фармації, косметології. **Ключові слова:** родина *Asteraceae*, інтродукція, лікарські рослини, сполуки, сировина.

Biochemical composition of phytoraw materials of annual and perennial introduced plants of the *Asteraceae* family in the conditions of Polissya, Ukraine. Ivashchenko I., Rakhmetov D.

In the context of global climate change, the introduction of highly productive, ecologically plastic, valuable plant species is becoming increasingly important. Representatives of the *Asteraceae* family are quite valuable medicinal, food, essential oil, ornamental, and honey plants, which have high resistance to adverse environmental conditions, productivity, and quality indicators. The subjects of the research were plants of the *Asteraceae* family: *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus*. Seed and planting material were obtained from the Department of Cultural Flora of the M. M. Grishko National Botanical Garden (NBG) of the NAS of Ukraine. Introductory studies were conducted in experimental plots of the Botanical Garden named after Heroes of Paratroopers of the Polesie National University, which is located in the Polissya zone of Ukraine, during 2013–2024. Biochemical analysis of phytoraw materials was carried out in the biochemical laboratory of the Department of Cultural Flora of the M. M. Hryshko National Botanical Garden of the NAS of Ukraine. The raw materials were collected in the flowering phase. The above-ground part of the plants was used for biochemical analysis. The quantitative and qualitative composition of the main components of plant raw materials of rare introduced plants of the *Asteraceae* family under cultivation conditions in the Central Polesie zone of Ukraine was studied. Among the collection of medicinal and aromatic plants of the *Asteraceae* family, the highest content of biologically active substances in the aboveground part of plants in the flowering phase was found in the species: *H. aromaticum*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *S. coronata*. A significant



content of ascorbic acid was distinguished by *H. aromaticum* (267.22 ± 81.14 mg %), *G. coronaria* var. *discolor* (235.79 ± 61.37 mg %), *G. coronaria* var. *coronaria* (172 ± 34.44 mg %), *S. coronata* (208.05 ± 113.21 mg %). The highest levels of carotene and total sugars were recorded in the raw materials of *G. coronaria* var. *discolor* (2.94 ± 1.40 mg %; 17.48 ± 1.78 %, respectively), *G. coronaria* var. *coronaria* (2.69 ± 1.56 mg %; 17.45 ± 1.46 %, respectively). The maximum acidity was noted for plants of *G. coronaria* var. *discolor* (4.83 ± 3.48 %), the maximum calcium content was in *S. coronata* (1.51 ± 0.79 %). The raw materials of introduced plants of the genus *Artemisia* were distinguished by a significant content of tannins: *A. austriaca* (8.66 ± 5.17 %), *A. dracunculus* f 2 (8.48 ± 0.95 %), *A. abrotanum* f 2 (8.23 ± 2.92 %). The maximum amount of phosphorus was accumulated by plants of *A. abrotanum* f 1 (0.286 ± 0.242 %). The results obtained indicate that the studied introduced plants of the *Asteraceae* family are valuable introduced plants, the raw materials of which are distinguished by a wide range of biologically active substances. *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus* are promising plants for cultivation in the Central Polissya. Polissya zone for use in the food industry, pharmacy, cosmetology. **Key words:** *Asteraceae* family, introduction, medicinal plants, compounds, raw materials.

Постановка проблеми. В умовах глобальних змін клімату інтродукція високопродуктивних, екологічно пластичних, цінних видів рослин набуває все більшого значення. В умовах ботанічного саду імені Героїв десантників Поліського національного університету створена колекція лікарських, ароматичних рослин-інтродуцентів родини *Asteraceae*: *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus*. Вивчення біохімічного складу сировини зазначених видів – один із аспектів інтродукційних досліджень.

Актуальність дослідження. Збільшення асортименту сировини лікарських, ароматичних рослин родини *Asteraceae* з метою застосування у фармації, косметології, харчовій промисловості в умовах Полісся України є перспективним і потребує вивчення їх біохімічного складу. Метою досліджень було встановити біохімічний склад сировини лікарських, ароматичних рослин родини *Asteraceae* в умовах Центрального Полісся України: *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus*.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цінність лікарських рослин полягає у біологічно активних речовинах, які містяться у сировині. У сучасній фармакології використовують біологічно активні речовини: ефірні олії, органічні кислоти, вітаміни, дубильні речовини, фітонциди та інші сполуки. Тому важливим етапом для визначення цінності інтродуцента є кількісна та якісна оцінка його сировини. Значущими показниками у корисних рослин можна вважати вміст основних поживних речовин, таких як вітаміни, макро-та мікроелементи, загальний вміст цукрів, сухої речовини, ліпідів та інших життєвоважливих сполук [1]. Досить цінними лікарськими, харчовими, ефіроолійними, декоративними, медоносними рослинами є представники родини *Asteraceae*, які мають високу стійкість до несприятливих умов середовища, продуктивність та якісні показники [2]. Ефіроолійні, пряно-ароматичні, лікарські рослини родини Айстрових багаті на біологічно активні речовини, тому використовую-

ються і як харчові, і як лікарські рослини в народній медицині та офіційній медицині, в косметології, парфумерії [3].

Скринінг літературних джерел щодо поширення, вирощування та використання у світі видів родів *Glebionis*, *Serratula*, *Artemisia*, *Tanacetum*, *Helenium* дозволяє зробити висновки, що деякі види мають гарні перспективи використання в різних галузях народного господарства України [4, 5, 6].

Наукова новизна. Вперше в умовах Центрального Полісся України вивчено біохімічний склад фітосировини рослин-інтродуцентів родини *Asteraceae*: *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus*.

Методологія дослідження. Предметом досліджень слугували рослини родини *Asteraceae*: *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus*. Насінний та посадковий матеріал отримано із відділу культурної флори Національного ботанічного саду (НБС) імені М. М. Гришка НАН України. Інтродукційні дослідження проводили на експериментальних ділянках ботанічного саду імені Героїв десантників Поліського національного університету упродовж 2013–2024 рр. Біохімічний аналіз фітосировини здійснювали у біохімічній лабораторії відділу культурної флори НБС імені М. М. Гришка НАН України. Сировину збирали у період цвітіння. Абсолютно суху речовину визначали шляхом висушування зразків при температурі 105°C до постійної маси; вміст жирів – методом визначення знежиреного залишку; кальцій – трилонометричним методом, фосфор – об'ємним методом з молібденовою рідиною; золу – методом спалювання в муфельній печі ($300\text{--}700^{\circ}\text{C}$); мокре озоллення – методом Куркаєва; аскорбінову кислоту – за Муррі; загальний вміст цукрів – за В. П. Крищенком; каротин – спектрофотометрично із застосуванням розчинника бензину Калоша (спектрофотометр UNICO 2800); вільні кислоти та їх кислі солі – титрометричним методом, заснованим на титруванні екстрагованих водою кислот розчином лугу відомої концентрації; дубильні

речовини – методом, заснованим на здатності їх до окислення в кислому середовищі перманганатом калію [7, 8].

Викладення основного матеріалу. Суха речовина – найважливіший компонент фітосировини, на 90–95 % складається із органічних сполук (вуглеводи, білки, ліпіди, нуклеїнові кислоти, та інші сполуки). Вміст сухої речовини в надземній масі досліджуваних рослин родини *Asteraceae* у фазу цвітіння складав від 16,24±3,72 (*G. coronaria* var. *discolor*) до 41,51±2,76 % (*A. maritima*). Високі показники вмісту сухої речовини виявлено також у інтродуцентів роду *Artemisia*: *A. abrotanum* f 2 (39,49±1,54), *A. abrotanum* f 1 (35,88±2,11), *A. austriaca* (38,59±5,44) (рис. 1).

Аскорбінова кислота – важлива біологічно активна сполука, що належить до похідних поліокси-γ-лактонів ненасичених карбонових кислот. Вітамін С відіграє важливу роль в організмі людини як природний антиоксидант, активізує ферменти, які забезпечують протікання процесів обміну вуглеводів і функціонування залоз внутрішньої секреції, забезпечує міцність кровоносних судин, сприяє загоєнню ран, підвищує стійкість організму проти інфекційних хвороб [9, 10, 11].

Вміст аскорбінової кислоти у надземній масі досліджуваних інтродуцентів знаходився в межах від 10,69±0,75 (*A. maritima*) до 349,93±24,83 мг% на суху масу (*H. aromaticum*) (рис. 2). В середньому за роками досліджень найвищі показники щодо вмісту аскорбінової кислоти зафіксовано у сировині *H. aromaticum* (267,22±81,14 мг%), *G. coronaria* var. *discolor* (235,79±61,37 мг%), *S. coronata*

(208,05±113,21 мг%). Помітне значне варіювання вмісту аскорбінової кислоти в зразках залежно від року вегетації рослин.

Сировина *G. coronaria* var. *discolor*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *S. coronata*, *H. aromaticum* також вирізнялась найвищими показниками вмісту каротину – 2,94±1,40; 2,69±1,56; 2,12±1,03; 1,76±2,04 мг% на суху масу, відповідно (див. рис. 3). Мінімальний вміст каротину зафіксовано у *T. balsamita* var. *balsamitoides* (0,64±0,16 мг%). Дослідження вмісту каротинів у фітосировині айстрових свідчить про незначний їх вміст у порівнянні з іншими видами рослин. Каротини (тетратерпени) – важлива поліфункціональна група біологічно активних сполук, у рослинах зустрічаються переважно у формі трьох ізомерів:

α-, β- і γ-каротину. Найбільш цінним є β-каротин, із якого утворюється ретинол. Роль ретинолу в організмі людини надзвичайно велика: забезпечення основних функцій печінки, покращення гостроти зору, регулювання росту і розмноження клітин, вироблення імуноглобулінів, пригнічення розмноження клітин злоякісних пухлин, стимулювання синтезу стероїдних гормонів [12].

Жири – ефіри жирних кислот з гліцерином. Рослинні жири (олії) багаті на ненасичені жирні кислоти. Ненасичені жирні кислоти трапляються лише в рослинних жирах і риб'ячому жирі, в організмі людини не синтезуються, але потрібні для багатьох біохімічних процесів і тому їх відносять до незамінних продуктів живлення. Крім фармацевтичного використання, жири й олії застосовують у косме-

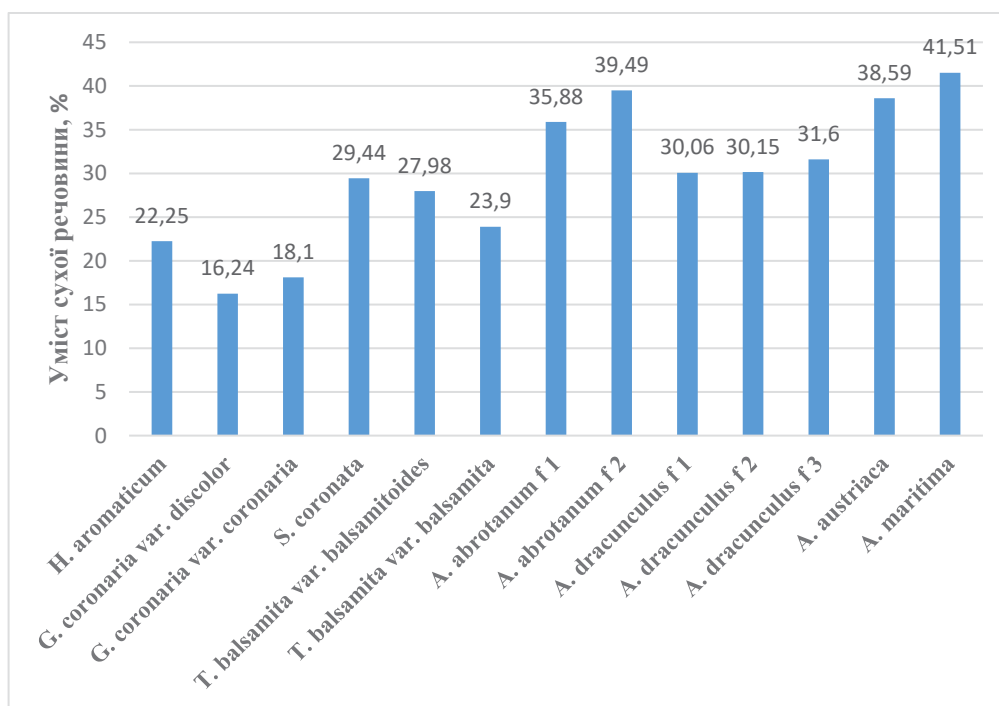


Рис. 1. Уміст сухої речовини у надземній масі рослин родини *Asteraceae* у фазу квітіння

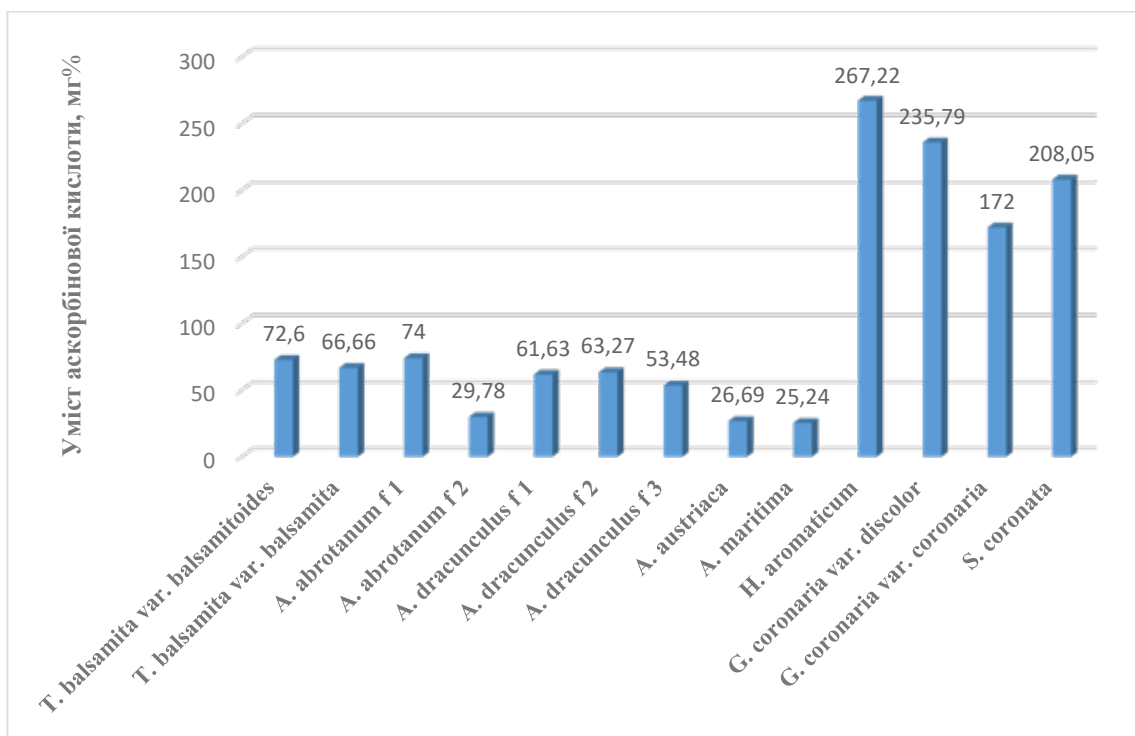


Рис. 2. Уміст аскорбінової кислоти у надземній масі рослин родини *Asteraceae* у фазу квітання

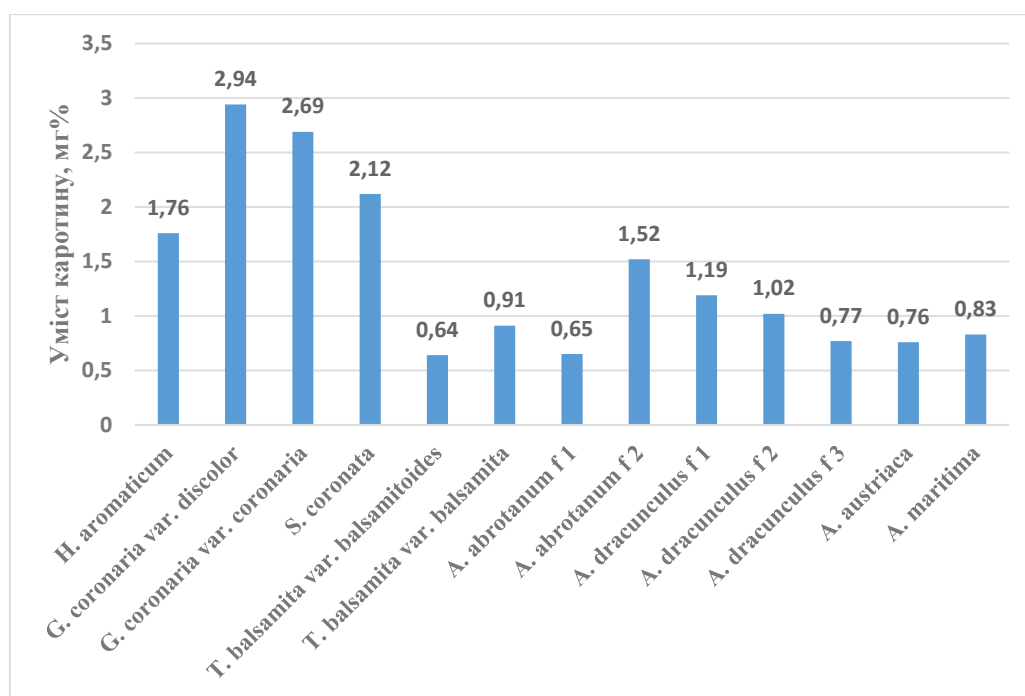


Рис. 3. Уміст каротину у надземній масі рослин родини *Asteraceae* у фазу цвітіння

тології. Жири є запасними речовинами і в значних кількостях накопичуються в насінні та плодах багатьох рослин. Найвищий вміст жирів виявлено у сировині полину австрійського – $5,74 \pm 2,49$ %, найнижчі показники відмічено у сировині *H. aromaticum* ($3,11 \pm 3,51$ %) (див. рис. 4).

Усі вуглеводи – це альдегіди, або кетони. Це найпоширеніша у рослинному світі група органічних речовин. Усі вуглеводи мають важливе значення у функціонуванні рослинних клітин і організму в цілому. Моносахариди відіграють важливу біологічну роль в організмі людини. Глюкоза бере участь

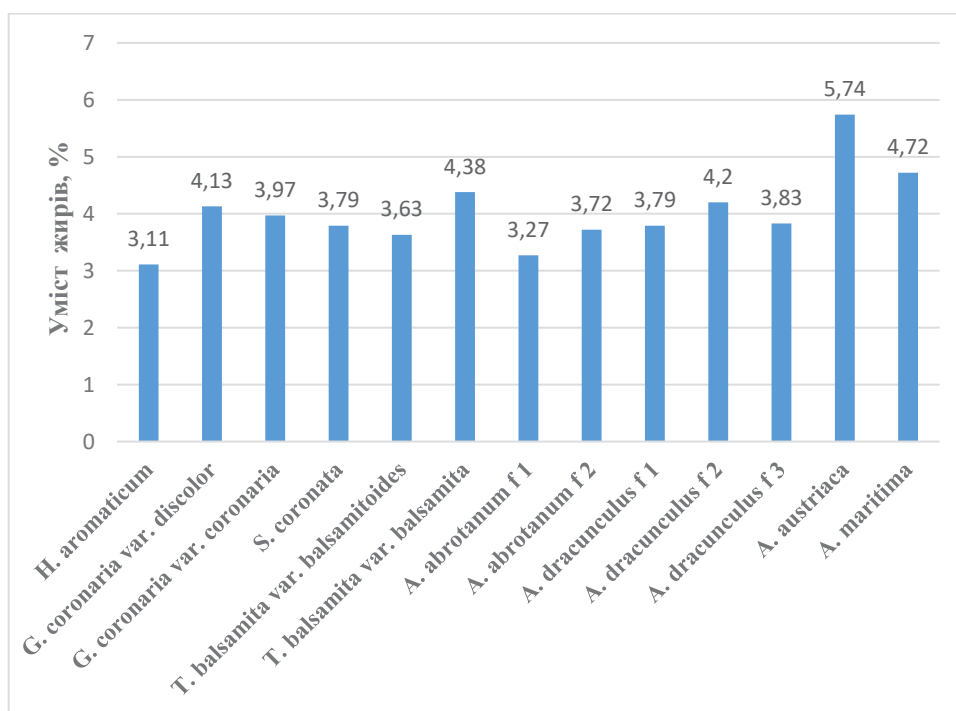


Рис. 4. Уміст жирів у надземній масі рослин родини Asteraceae у фазу цвітіння

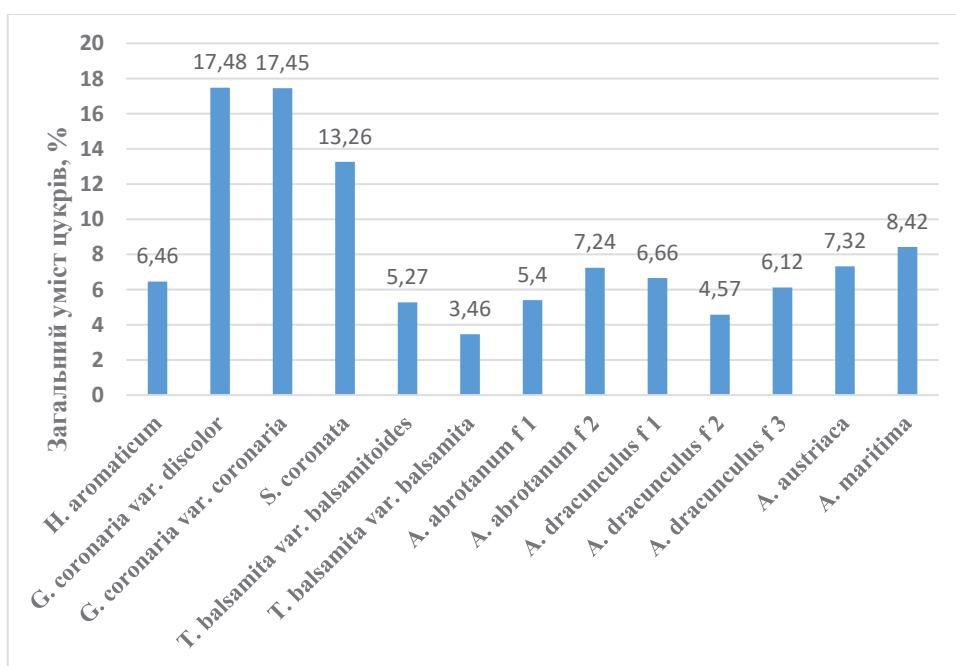


Рис. 5. Загальний уміст цукрів у надземній масі рослин родини Asteraceae у фазу цвітіння

у харчуванні тканин мозку, працюючих м'язів, легко перетворюється в жири в організмі, особливо при її надмірному надходженні з їжею. За результатами наших досліджень максимальний вміст загальних цукрів відмічено у сировині *G. coronaria* var. *discolor* – $17,48 \pm 1,78$ та *G. coronaria* var. *coronaria* – $17,45 \pm 1,46$ %. (рис. 5). Дещо нижчими були показники у *S. coronata* – $13,26 \pm 6,53$ %.

Один із важливих показників, що визначаються в ході фармацевтичного аналізу – зола, яка містить хімічні елементи: K, Na, Ca, Mg, Ti, Si, P, S, Fe, B, P, Cl, Ba, Ni, Co та ін. Вміст золи у рослинній сировині є одним із показників її якості. Рослинні організми поглинають із навколишнього середовища необхідні поживні елементи, які залучають у метаболічні цикли. В результаті складних фізіолого-біохімічних

реакцій підтримується структура і функціонування клітин, тканин, органів і цілісного рослинного організму. Макро- та мікроелементи є необхідними та незамінними для організму людини. Мінеральні речовини беруть активну участь у складних біохімічних та фізіологічних процесах і забезпечують підтримання гомеостазу організму. Лікарська рослина сировина, яка накопичує значну кількість мікроелементів, може використовуватись для профілактики та лікування багатьох захворювань, які виникають внаслідок порушення мікроелементного балансу людського організму. Вивчення елементного складу рослин допоможе у використанні рослин для профілактики та лікування гіпо- та гіперелементозів.

За результатами наших досліджень встановлено, що за вмістом золи досліджувані інтродуценти відрізнялись незначно. Показники становили від $4,55 \pm 1,50$ (*A. austriaca*) до $6,70 \pm 1,52$ % (*A. maritima*). (див. рис. 6).

Фосфор – важливий елемент мінерального живлення рослин. Фосфатам належить ключова функція в обміні речовин. Вони слугують структурними компонентами фітину, фосфатидів, нуклеїнових кислот, фосфорних ефірів, фосфорильованих цукрів. Фосфору належить надзвичайно важливе значення в обміні жирів, вуглеводів, білків, у процесах дихання і фотосинтезу. Біологічна роль фосфору визначається його участю у формуванні й регенерації клітин, засвоєнні вітамінів та розвитку зубів і кісток, в обміні енергії, регуляції кислотно-лужного балансу, функціонуванні нирок, нервів, м'язів серця.

Максимальний вміст фосфору виявлено у сировині *A. abrotanum* f 1 ($0,286 \pm 0,242$ %), мінімальний – *A. dracunculus* f 3 ($0,071 \pm 0,023$ %) (рис. 7).

Кальцій разом із фосфором складає основу кісткової тканини, нормалізує обмін вуглеводів і води, приймає участь в процесах передачі нервово-м'язового збудження. Його вміст у надземній масі досліджуваних видів рослин варіював від $1,51 \pm 0,79$ (*S. coronata*) до $0,621 \pm 0,326$ % (*A. dracunculus*) (рис. 8).

Важливим показником є вміст органічних кислот – кількість вільних кислот, їх кислих солей, які містяться в сировині. Органічні кислоти – багатоосновні *оксикислоти*, що містяться в клітинному соку рослин у вільному стані та у вигляді солей або ефірів. У плодах переважають вільні органічні кислоти, а в інших органах рослин – пов'язані форми. Виявлені яблучна, лимонна, щавлева, винна, саліцилова, хінна, бензойна, валеріанова, бурштинова, кавава і інші кислоти.

Органічні кислоти в рослинах відіграють ключову роль у метаболізмі, диханні. Вони беруть участь у різних біохімічних процесах, в тому числі в біосинтезі жирів, пектину, лігніну, хлорофілу, ароматичних амінокислот. Кислоти відіграють важливу роль в обміні речовин. В організмі людини розчиняють деякі небажані відкладення, наприклад, солі сечової кислоти, які потім легко виводяться з організму. Органічні кислоти визначають смак та аромат фруктів, ягід, овочів. Деякі органічні кислоти мають консервуючі властивості, наприклад, лимонна кислота і саліцилова кислота. Вміст титрованих кислот в надземній масі рослин родини *Asteraceae* знаходився в межах від $1,8 \pm 0,67$ до $4,83 \pm 3,48$ % (рис. 9). Найвища кислотність відзначена для рослин *G. coronaria* var. *discolor* (рис. 9). Підвищеною кислотністю вирізнялась сировина *S. coronata* ($4,12 \pm 2,73$ %), *G. coronaria*

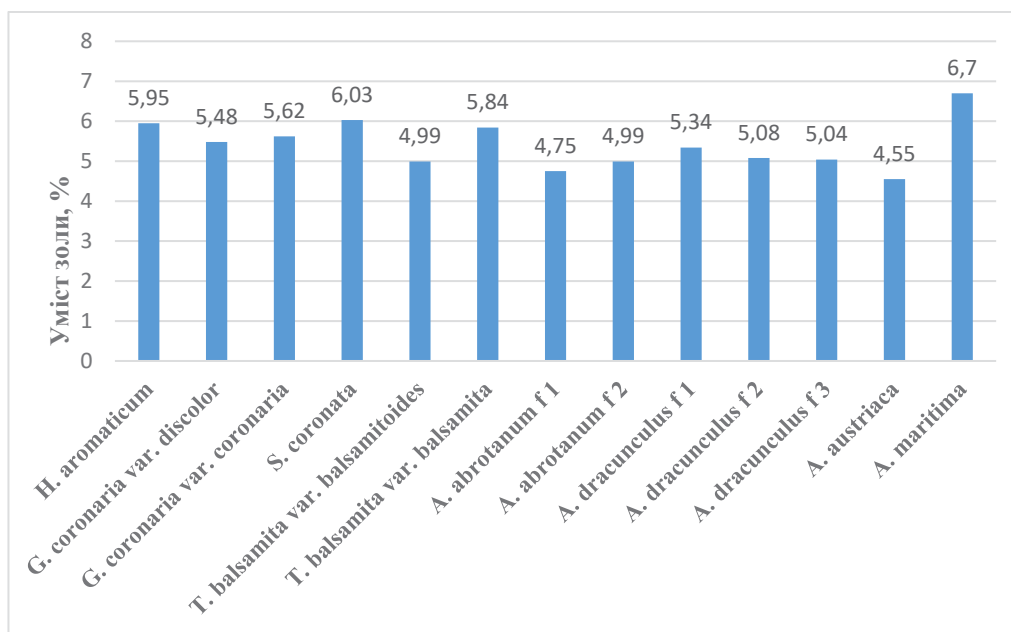


Рис. 6. Уміст золи у надземній масі рослин родини *Asteraceae* у фазу цвітіння

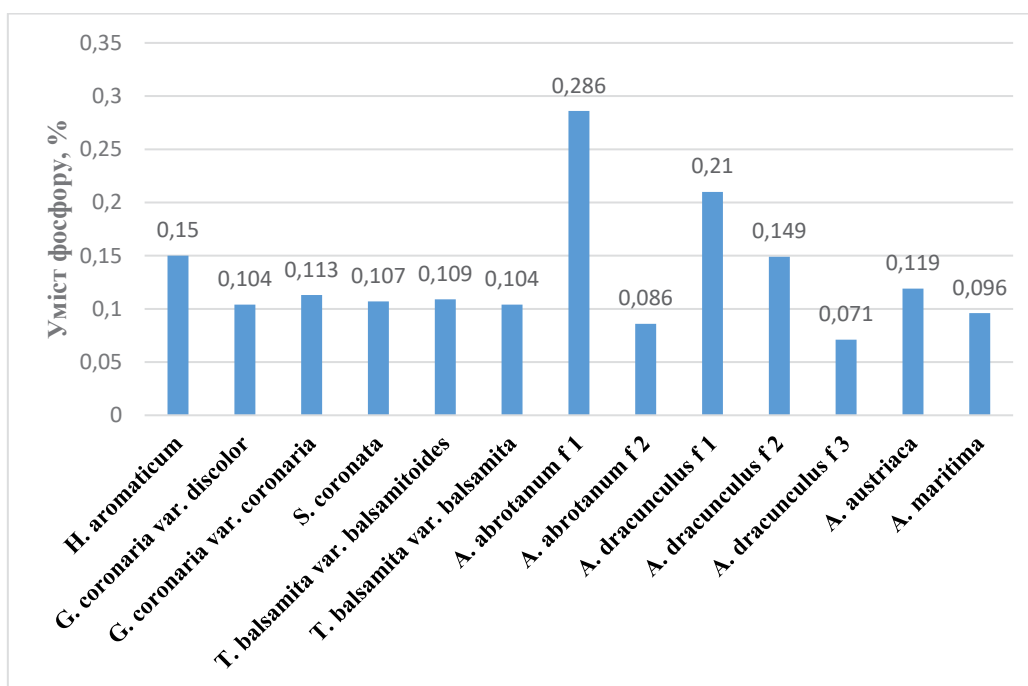


Рис. 7. Уміст фосфору у надземній масі рослин родини Asteraceae у фазу цвітіння

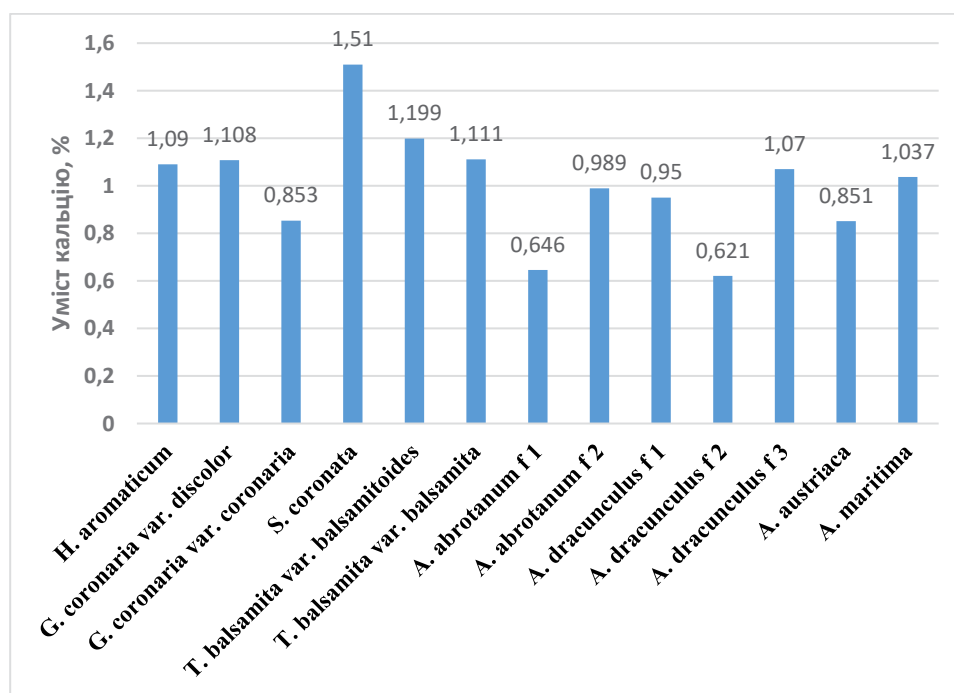


Рис. 8. Уміст кальцію у надземній масі рослин родини Asteraceae у фазу цвітіння

var. coronaria ($4,83 \pm 3,48$ %). *H. aromaticum* ($3,78 \pm 4,28$ %) (рис. 9).

Дубильні речовини відносяться до складної групи низько- та високомолекулярних природних поліфенолів. Дубильні речовини широко використовуються в медичній практиці: виявляють в'язучу, проти-запальну й антимікробну дію. Преперати, що містять дубильні речовини, застосовують при гострих

і хронічних колітах, ентеритах, гастритах, іноді як кровоспинний засіб, при запальних процесах ротової порожнини, гортані, носа, а також при опіках, пролежнях, виразках. Природні фенольні сполуки являються потужними антиоксидантами і відомі як фармакологічно активні сполуки, здатні до корекції різних патологічних станів, в тому числі викликаних інфекційними ураженнями організму.

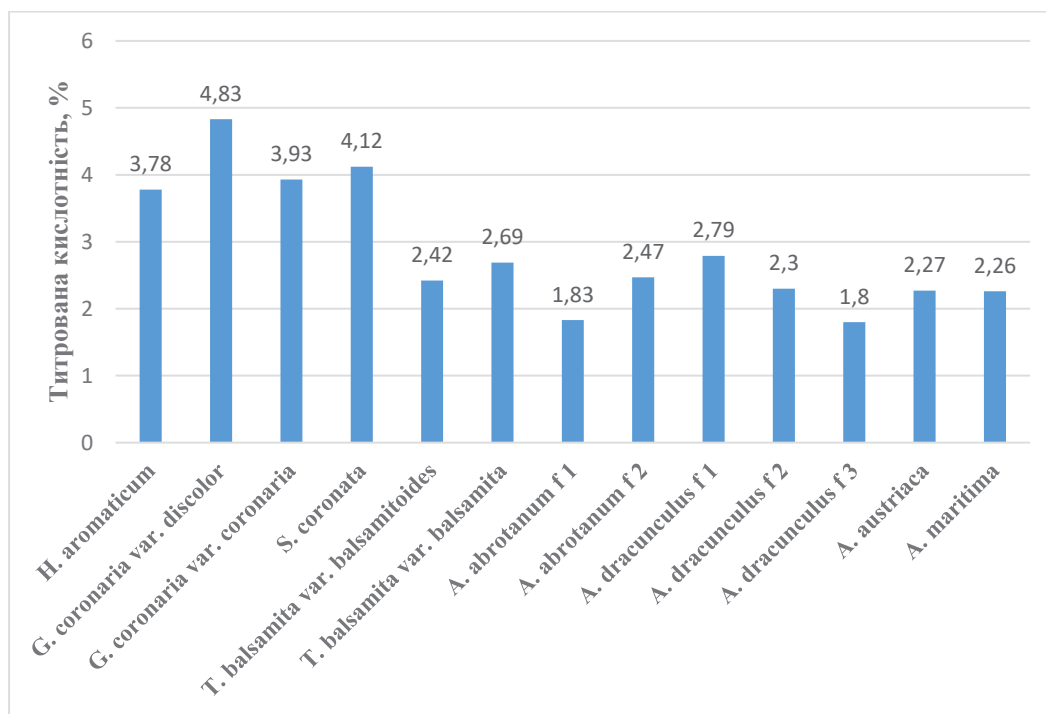


Рис. 9. Уміст титрованих кислот у надземній масі рослин родини Asteraceae у фазу цвітіння

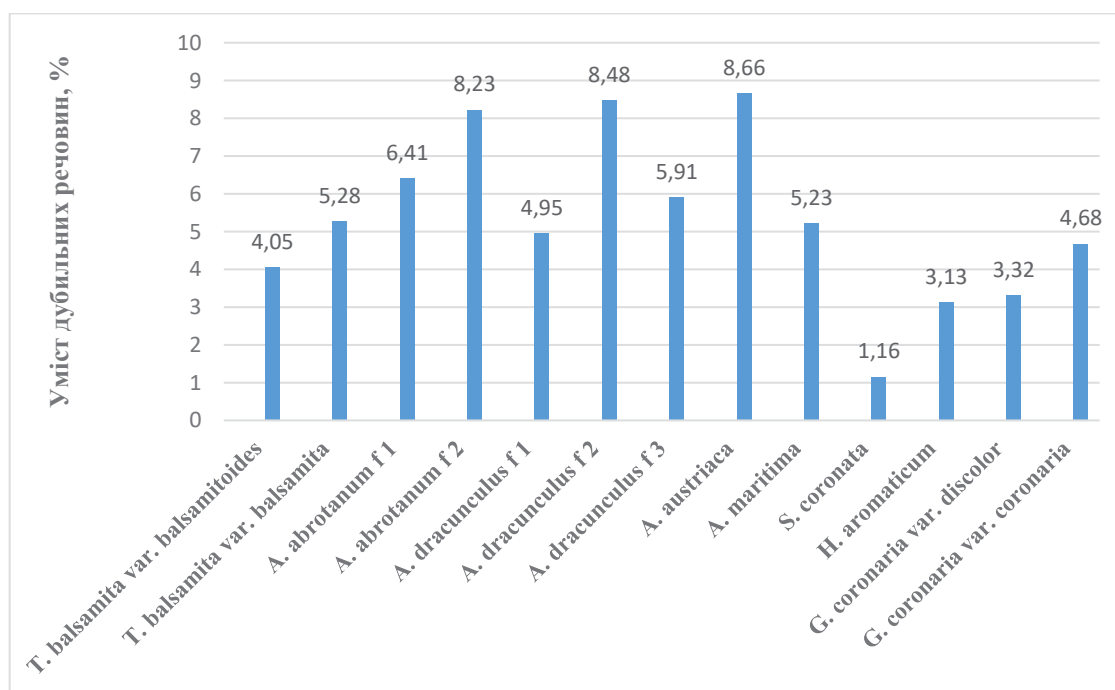


Рис. 10. Уміст дубильних речовин у надземній масі рослин родини Asteraceae у фазу цвітіння

Встановлена радіопротекторна дія більшості дубильних речовин, а також їх здатність до видалення з організму радіоактивних ізотопів цезію та стронцію. Загалом, рослини родини *Asteraceae* характеризуються високим вмістом дубильних речовин. Результати досліджень свідчать, що однорічні і багаторічні рослини родини *Asteraceae* накопичують

дубильні речовини в надземній частині. Їх вміст залежить від віку та фази розвитку рослин, кліматичних та едафічних умов тощо. Максимальна кількість дубильних речовин виявлена у сировині інтродуцентів роду *Artemisia*: *A. austriaca* ($8,66 \pm 5,17$ %), *A. dracunculus* f 2 ($8,48 \pm 0,95$ %), *A. abrotanum* f 2 ($8,23 \pm 2,92$ %); мінімальна – у *S. coronata* ($1,16 \pm 0,41$ %), (рис. 10).

Вміст біохімічних сполук у сировині інтродуцентів змінювався за роками досліджень і залежав від вікових особливостей рослин. Відомо, що вміст первинних і вторинних метаболітів у надземній масі інтродуцентів залежить від видових, генотипових, вікових особливостей і фази розвитку рослин [13].

Висновки. Встановлено кількісний і якісний склад основних компонентів рослинної сировини малопоширених рослин-інтродуцентів родини *Asteraceae* за умов культивування в зоні Центрального Полісся України. Серед колекції лікарських, ароматичних рослин родини *Asteraceae* найвищий вміст біологічно активних речовин у надземній частині рослин у фазу цвітіння встановлено у видів: *H. aromaticum*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *G. coronaria* var. *coronaria*, *S. coronata*. Значним вмістом аскорбінової кислоти вирізнялись *H. aromaticum* (267,22±81,14 мг%), *G. coronaria* var. *discolor* (235,79±61,37 мг%), *G. coronaria* var. *coronaria* (172±34,44 мг%), *S. coronata* (208,05±113,21 мг%). Найвищі показники вмісту каротину, загальних цукрів зафіксовано у сировині

G. coronaria var. *discolor* (2,94±1,40 мг%; 17,48±1,78%, відповідно), *G. coronaria* var. *coronaria* (2,69±1,56 мг%; 17,45±1,46 %, відповідно). Максимальна кислотність відзначена для рослин *G. coronaria* var. *discolor* (4,83±3,48 %), максимальний вміст кальцію – у *S. coronata* (1,51±0,79 %). Сировина інтродуцентів роду *Artemisia* вирізнялась значним вмістом дубильних речовин: *A. austriaca* (8,66±5,17 %), *A. dracunculus* f 2 (8,48±0,95 %), *A. abrotanum* f 2 (8,23±2,92 %). Максимальну кількість фосфору накопичували рослини *A. abrotanum* f 1 (0,286±0,242 %). Отримані результати свідчать, що досліджувані види рослин родини *Asteraceae* цінні інтродуценти, сировина яких вирізняється широким спектром біологічно активних речовин. *Serratula coronata*, *Helenium aromaticum*, *Tanacetum balsamita*, *Glebionis coronaria*, *Artemisia abrotanum*, *Artemisia maritima*, *Artemisia austriaca*, *Artemisia dracunculus* – перспективні рослини для культивування в зоні Центрального Полісся з метою використання у харчовій промисловості, фармації, косметології.

Література

1. Біологічні основи інтродукції перспективних енергетичних та ароматичних рослин в Україні / Д. Б. Рахметов та ін. Київ: Національна академія наук України, НБС імені М. М. Гришка, 2024. 314 с. URL : <https://doi.org/10.59647/978-617-14-0300-0/1>.
2. Рахметов Д. Б. Теоретичні та прикладні аспекти інтродукції рослин в Україні. К.: Аграр Медіа Груп, 2011. 398 с.
3. The potential medicinal value of plants from *Asteraceae* family with antioxidant defense enzymes as biological targets / S. Koc et al. *Pharmaceutical biology*. 2015. Vol. 53, no. 5. P. 746–751. DOI:10.3109/13880209.2014.942788.
4. Unveiling the phytochemical profile and biological potential of five *Artemisia* species / A. Trifan et al. *Antioxidants*. 2022. Vol. 11, no. 5. Art. 1017. URL : <https://doi.org/10.3390/antiox11051017>.
5. Tawaha K., Hudaib M. Volatile oil profiles of the aerial parts of Jordanian garland, *Chrysanthemum coronarium*. *Pharmaceutical Biology*. 2010. Vol. 48, no.10. P. 1108–1114. DOI: 10.3109/13880200903505641.
6. Antibacterial and antioxidant activity of essential oils and extracts from costmary (*Tanacetum balsamita* L.) and tansy (*Tanacetum vulgare* L.) / K. B. Bączek et al. *Industrial Crops and Products*. 2017. Vol. 102. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.03.009.
7. Грицаєнко З. М., Грицаєнко А. О., Карпенко В. П. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ: НІЧЛАВА, 2003. 320 с.
8. Державна фармакопея України : у 3 т. Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». 2-е вид. Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2015. Т. 1. 1128 с.
9. Ascorbic acid biosynthesis: a precursor study on plants / A. D. Barata-Soares et al. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 2004. Vol. 16, no 3. P.147–154.
10. Metabolism and regulation of ascorbic acid in fruits / X. Zheng et al. *Plants*. 2022. Vol. 11, no. 12. Art. 1602. DOI: 10.3390/plants11121602.
11. Соколова Л. В. Визначення кількісного вмісту кислоти аскорбінової в сублімованих порошках рослин. *Український медичний альманах*. 2010. Т. 13, № 6. С. 133–136. URL : http://nbuv.gov.ua/UJRN/Fch_2014_3_20.
12. Варанкіна О. О. Біологічна дія бета-каротину: позитивні і негативні аспекти. *Біопроцеси, біотехнологія харчових продуктів, БАП*. 2013. Т. 4, № 25. С. 46–49.
13. Котюк Л. А. Біолого-екологічні основи інтродукції ароматичних рослин родини *Lamiaceae* Lindl. в Центральному Поліссі України: дис. докт. біол. наук: спец. «Ботаніка» 03.00.05. / Національний ботанічний сад імені М. М. Гришка НАН. Київ, 2019. 465 с.

Дата першого надходження статті до видання: 01.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОСТІ ДОВКІЛЛЯ ЗА ПОКАЗНИКАМИ АКУСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Маслов І.В.¹, Внукова Н.В.¹, Маслова Н.М.²

¹Харківський національний автомобільно-дорожній університет
вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків

²Харківський національний медичний університет
пр. Науки, 4, 61022, м. Харків

maslvihor@gmail.com, vnukovanv@ukr.net, maslvanat@gmail.com

Проблема оцінки екологічності довкілля набула особливої актуальності в умовах неконтрольованого зростання антропогенного навантаження, зокрема стрімкого поширення акустичного забруднення в урбанізованих та промислових зонах. Шум є не лише санітарно-гігієнічним, а й потужним екологічним чинником, який безпосередньо впливає на фізіологічний стан біоти, якість життя населення та загальну стабільність природних екосистем. Сучасна екологічна наука розглядає екологічність як комплексний інтегральний показник гармонійності взаємодії людини з природним середовищем, що об'єктивно відображає баланс між руйнівними техногенними впливами та природними процесами самовідновлення. Метою дослідження було узагальнення теоретичних і методичних основ оцінки екологічності довкілля за ключовими показниками акустичного навантаження, визначення сучасних підходів до його просторового аналізу та обґрунтування можливостей використання передових ГІС-технологій у національній системі екологічного моніторингу. Встановлено, що екологічність довкілля безперервно формується під сукупним впливом комплексу чинників – хімічних, фізичних, біологічних і кліматичних, серед яких фізичні, зокрема шумове навантаження, мають яскраво виражений системний характер дії. У статті детально узагальнено негативний вплив акустичного забруднення на людину (серцево-судинні захворювання, стрес), тварин (порушення комунікації, вимушена міграція) і рослинність (зниження продуктивності). Запропоновано нову просторову класифікацію територій за рівнем шумового навантаження (допустимий, помірний, підвищений, критичний) та науково обґрунтовано доцільність використання міжнародних інтегральних індексів – Noise Exposure Index (NEI) і Acoustic Ecological Index (AEI) – для об'єктивної оцінки екологічності середовища. Окремо показано провідну роль геоінформаційних систем у створенні високоточних шумових карт і візуалізації просторових закономірностей поширення звукових хвиль. Доведено, що оцінка екологічності довкілля за акустичними показниками вимагає виключно інтегрованого підходу, який органічно поєднує медико-гігієнічні, соціоекологічні та просторово-геоекологічні аспекти. Подальший розвиток цифрового екологічного моніторингу, зокрема на базі державної національної платформи «ЕкоСистема», створює надійні передумови для суттєвого вдосконалення системи управління якістю довкілля, швидкої гармонізації національних стандартів із жорсткими європейськими вимогами та стратегічного підвищення загального рівня екологічної безпеки в Україні. *Ключові слова:* екологічність довкілля, шумове навантаження, акустичне забруднення, геоекологічний підхід, екологічний моніторинг, екологічна безпека.

Theoretical foundations for assessing environmental ecology based on acoustic load indicators. Maslov I., Vnukova N., Maslova N.

The problem of assessing environmental ecology has gained particular relevance amid the uncontrolled growth of anthropogenic load, specifically the rapid spread of acoustic pollution in urbanized and industrial zones. Noise is not only a sanitary and hygienic factor but also a powerful ecological one, directly affecting the physiological state of biota, the quality of life of the population, and the overall stability of natural ecosystems. Modern ecological science considers environmental ecology as a complex integral indicator of the harmonious interaction between humans and the natural environment, objectively reflecting the balance between destructive technogenic impacts and natural self-recovery processes. The purpose of the study was to generalize the theoretical and methodological foundations for assessing environmental ecology based on key acoustic load indicators, determine modern approaches to its spatial analysis, and substantiate the possibilities of using advanced GIS technologies in the national environmental monitoring system. It was established that environmental ecology is continuously formed under the combined influence of a complex of factors—chemical, physical, biological, and climatic—among which physical factors, particularly noise load, have a clearly defined systemic effect. The article comprehensively summarizes the negative impact of acoustic pollution on humans (cardiovascular diseases, stress), animals (communication disruption, forced migration), and vegetation (decreased productivity). A new spatial classification of territories based on the level of noise load (permissible, moderate, elevated, critical) is proposed, and the feasibility of using international integral indices—the Noise Exposure Index (NEI) and the Acoustic Ecological Index (AEI)—for an objective assessment of environmental ecology is scientifically substantiated. Furthermore, the leading role of geographic information systems in creating high-precision noise maps and visualizing the spatial patterns of sound wave propagation is demonstrated. It is proven that assessing environmental ecology using acoustic indicators requires an exclusively integrated approach that organically combines medical-hygienic, socio-ecological, and spatial-geoecological aspects. The further development of digital environmental monitoring, particularly based on the state national platform “EcoSystem,” creates reliable prerequisites for significantly improving the environmental quality management system, rapidly harmonizing national standards with strict European requirements, and strategically increasing the overall level of environmental safety in Ukraine. *Key words:* environmental ecology, noise load, acoustic pollution, geo-ecological approach, environmental monitoring, ecological safety.



Постановка проблеми. У сучасних умовах урбанізації та інтенсивного розвитку транспортної, промислової й інфраструктурної діяльності рівень акустичного навантаження на довкілля невинно зростає. Шумове забруднення поступово перетворюється на один із найпоширеніших антропогенних чинників, що негативно впливають як на стан екосистем, так і на здоров'я людини. Надмірний рівень шуму спричиняє фізіологічний і психологічний дискомфорт, знижує працездатність населення, порушує умови відтворення біорізноманіття та змінює природні зв'язки в екологічних системах.

Актуальність дослідження. Акустичне навантаження стає вагомим індикатором якості довкілля, який потребує системного аналізу та контролю. Попри очевидну значущість цієї проблеми, в Україні питання оцінки екологічності середовища за акустичними параметрами залишається недостатньо розробленим. Діючі системи екологічного моніторингу переважно зосереджені на контролі атмосферного, водного та ґрунтового середовищ, тоді як шумовий компонент часто залишається поза увагою. З огляду на це, дослідження теоретичних засад оцінки екологічності довкілля за показниками акустичного навантаження набуває особливої актуальності та сприяє вдосконаленню підходів до забезпечення сталого розвитку і підвищення якості життя населення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Напрямок інтеграції акустичного моніторингу в національні екологічні системи узгоджується з державними ініціативами та науковими програмами, зокрема з концепцією розвитку інформаційної системи «ЕкоСистема», ініційованої Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України, що передбачає цифровізацію процесів збору, обміну та аналізу екологічних даних. З огляду на це, дослідження теоретичних засад оцінки екологічності довкілля за показниками акустичного навантаження набуває особливої актуальності та сприяє вдосконаленню підходів до забезпечення сталого розвитку і підвищення якості життя населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика акустичного навантаження як чинника екологічної безпеки дедалі частіше стає предметом наукових досліджень у світі. Відповідно до «Environmental Noise Guidelines for the European Region» [1] шумове забруднення визнано одним із найвагоміших екологічних ризиків для здоров'я населення після забруднення атмосферного повітря. Європейське агентство з навколишнього середовища [2] відзначає, що понад 20 % жителів Європи зазнають хронічного впливу шуму, рівень якого перевищує рекомендовані санітарні норми. Наведені дані стали підґрунтям для посилення контролю та регламентації шумових впливів у межах Директиви 2002/49/ЄС ЄС, що передбачає створення стратегіч-

них карт шуму та планів дій зі зниження акустичного навантаження [3-4].

Сучасні наукові праці доводять, що тривалий вплив шуму провокує серцево-судинні, нервові й психоемоційні порушення, а також негативно впливає на когнітивні функції дітей [5]. Окремий напрям досліджень присвячений екологічним наслідкам акустичного навантаження, зокрема впливу шуму на поведінку та чисельність тварин, особливо птахів і комах [6]. На основі цих досліджень формується нова галузь – екоакустика, що розглядає шум як індикатор стану екосистем.

У науковій літературі останніх років значну увагу приділено розвитку методів вимірювання та оцінки шумового фону. Вчені описують підходи до формування «акустичного ландшафту» міста, де інтегруються фізичні, соціальні й естетичні аспекти шуму [7]. У дослідженнях розкривається потенціал використання біоакустичних індексів для оцінки біорізноманіття, що створює передумови для поєднання традиційного шумового моніторингу з оцінкою екологічності середовища [8]. Новітні роботи демонструють ефективність застосування штучного інтелекту для автоматизованої класифікації джерел шуму та створення інтерактивних карт акустичного навантаження [9].

В Україні питання оцінки екологічності довкілля за показниками шуму поки що не отримало належного розвитку. Хоча окремі дослідження висвітлюють проблему перевищення допустимих рівнів шуму у великих містах, системна інтеграція акустичних даних у державну систему моніторингу залишається обмеженою [10-11]. Проблема полягає у відсутності єдиної методики збору та аналізу шумових показників, а також недостатній кількості стаціонарних пунктів спостереження [12-13].

Водночас розвиток державної інформаційної системи «ЕкоСистема», ініційованої Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України, відкриває нові можливості для включення акустичного компонента в єдиний екологічний моніторинг. Такий підхід відповідає сучасним тенденціям цифровізації екологічного контролю та впровадження концепції «розумного моніторингу» довкілля [14-15].

Таким чином, аналіз наукових публікацій свідчить, що у світі спостерігається активний розвиток теоретичних і методичних підходів до оцінки шумового навантаження, тоді як в Україні ця проблематика перебуває на етапі становлення. Отже, існує необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення методології оцінки екологічності середовища за акустичними показниками, адаптацію міжнародного досвіду та інтеграцію результатів у національні екологічні програми.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Хоча у світі спостерігається активний розвиток методів оцінки шумового навантаження, в Україні ця проблематика перебуває на етапі становлення. Окремі вітчизняні дослідження [10, 11]

висвітлюють проблему перевищення шумів у містах, проте системна інтеграція акустичних даних у державну систему моніторингу залишається обмеженою. Невирішеною залишається проблема відсутності єдиної комплексної методики збору, обробки й інтеграції даних про акустичне навантаження, що ускладнює формування об'єктивної картини екологічного стану територій та розроблення ефективних управлінських рішень.

Новизна. Вперше запропоновано комплексну просторову класифікацію територій за рівнем шумового навантаження з виділенням чотирьох зон (допустимий, помірний, підвищений, критичний), адаптовану для цілей екологічного моніторингу. Обґрунтовано доцільність використання міжнародних інтегральних індексів (NEI та AEI) у вітчизняній практиці для оцінки екологічності середовища.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Методологічне значення роботи полягає в обґрунтуванні синергії трьох наукових підходів – антропоцентричного, еколого-ландшафтного та геоекологічного – для всебічної оцінки екологічності довкілля. Доведено необхідність застосування геоінформаційних систем як базового інструменту просторового моделювання шумових полів.

Виклад основного матеріалу. Оцінка екологічності довкілля є одним із ключових напрямів сучасної екологічної науки, оскільки вона дає змогу визначити рівень гармонійності взаємодії людини з природним середовищем. У широкому розумінні екологічність довкілля розглядається як інтегральний показник, що відображає стан природних компонентів та рівень їх здатності підтримувати життєві процеси без суттєвих втрат біорізноманіття, стабільності екосистем і якості життя населення. Вона характеризує баланс між антропогенним впливом і природними відновними процесами, тобто є відображенням якості середовища у контексті сталого розвитку.

У науковій літературі існує кілька підходів до розуміння сутності поняття екологічності довкілля, кожен із яких відображає певну наукову традицію та методологічну позицію. Найбільш поширеними є антропоцентричний, еколого-ландшафтний і геоекологічний підходи, які формують цілісне уявлення про взаємозв'язок між людиною, природою та просторовими структурами середовища [16]. Згідно з антропоцентричним підходом, екологічність розглядається як міра сприятливості природного середовища для життя і діяльності людини. Основна увага приділяється таким критеріям, як рівень комфортності, безпеки, санітарно-гігієнічного стану повітря, води, ґрунтів, а також відсутність надмірних фізичних і хімічних впливів, включно з шумом і вібрацією. Такий підхід переважає у працях медико-біологічного та соціоекологічного спрямування, де екологічність трактується через призму здоров'я та якості життя населення.

Еколого-ландшафтний підхід орієнтований на вивчення стану рівноваги природних ландшафтів, їхньої стійкості до зовнішніх навантажень та здатності до саморегуляції. Екологічність у цьому контексті є властивістю природних систем підтримувати стабільність енергетичних, біотичних і матеріальних потоків у межах певної території. Дослідники цього напрямку наголошують на важливості просторово-часового аналізу впливів і на необхідності врахування морфологічної структури ландшафту, що визначає ступінь акумуляції або розсіювання шумового навантаження [17].

Геоекологічний підхід поєднує природничо-наукові й просторові принципи, розглядаючи екологічність як результат взаємодії геокомпонентів і антропогенних процесів у межах території. Його сутність полягає у виявленні просторових закономірностей розподілу екологічних ризиків, визначенні територіальної неоднорідності стану довкілля та встановленні зв'язків між фізико-географічними умовами й рівнем антропогенного навантаження. Такий підхід широко застосовується в геоінформаційних і картографічних дослідженнях, де екологічність розглядається як інтегральна характеристика простору, що формується під впливом різних природних і соціально-економічних чинників [18].

Таким чином, три підходи відрізняються акцентами, але взаємодоповнюють один одного: антропоцентричний визначає значення екологічності для людини, еколого-ландшафтний – для природних систем, а геоекологічний – для просторової організації середовища. Їхнє поєднання створює концептуальну основу для комплексної оцінки екологічності довкілля, у тому числі за показниками акустичного навантаження, що є важливою складовою сучасного екологічного моніторингу.

Між екологічністю довкілля та такими категоріями, як екологічна безпека, екологічний комфорт і сталий розвиток, існує тісний взаємозв'язок. Екологічна безпека визначає мінімізацію ризиків для людини та біоти, екологічний комфорт – суб'єктивне сприйняття якості середовища проживання, а сталий розвиток – цільову орієнтацію на збереження природного потенціалу для майбутніх поколінь. Разом вони формують комплексну систему оцінки стану довкілля, у якій екологічність виступає інтегральним результатом взаємодії природних і соціально-економічних факторів.

Варто додати, що серед чинників, що знижують екологічність, основними є забруднення повітря, води, ґрунтів, деградація природних ресурсів, накопичення відходів, підвищення шумового та вібраційного навантаження, зміна клімату. Особливе місце серед них займає шумове забруднення, яке має не лише санітарно-гігієнічне, але й екологічне значення.

Як видно з наведених у таблиці 1 даних, екологічність довкілля формується під впливом комп-

лексу взаємопов'язаних чинників – хімічних, фізичних, біологічних і кліматичних. Серед них особливе місце займають фізичні чинники, зокрема шумове навантаження, яке часто недооцінюється в системі екологічного моніторингу. На відміну від більш очевидних видів забруднення, акустичний вплив має прихований, але системний характер, поступово знижуючи якість середовища проживання як для людини, так і для живих організмів.

Саме тому шум розглядається як один із ключових показників екологічності середовища. Це коливальний процес у пружному середовищі, який характеризується частотою, інтенсивністю та спектральним складом. Його фізична природа полягає у поширенні механічних хвиль у повітрі або інших середовищах. У межах екологічної оцінки шум виступає не лише як фізичне явище, а як антропогенний стресор, що впливає на людину, тваринний і рослинний світ.

Надмірне акустичне навантаження спричиняє зміни поведінки у птахів та ссавців, порушення комунікаційних сигналів, підвищення рівня тривожності, а в окремих випадках – міграцію біоти з територій з підвищеним шумом. У людини це проявляється у вигляді втоми, безсоння, підвищеного тиску та порушень нервової системи. Таким чином, шум

має як фізичну, так і біоекологічну складову впливу, що робить його вагомим індикатором стану довкілля.

Варто зазначити, що поширення шуму має виразні геоекотичні особливості. Воно залежить від рельєфу, типу забудови, ландшафтних меж і кліматичних умов. Наприклад, відкриті рівнинні території сприяють дальшому поширенню звукових хвиль, тоді як густозасаджені лісові зони чи пагорбистий рельєф сприяють їх частковому поглинанню та розсіюванню. Така просторово-географічна неоднорідність визначає необхідність використання геоінформаційних систем (ГІС) для моделювання шумових полів і визначення рівнів акустичного навантаження в різних типах ландшафтів.

Класифікація територій за рівнем шумового навантаження передбачає поділ на зони з допустимим, помірним, підвищеним і критичним рівнем шуму. Таке зонування дозволяє планувати заходи з шумозахисту та визначати пріоритети в міському і регіональному плануванні.

Оцінка екологічності довкілля на основі акустичних показників передбачає застосування комплексного підходу, який поєднує гігієнічні, соціоекологічні та геоекотичні аспекти. Гігієнічний підхід зорієнтований на забезпечення дотримання норма-

Таблиця 1

Основні чинники, що знижують екологічність довкілля

Група чинників	Приклади проявів	Наслідки для екосистем
Хімічні	Забруднення повітря, води, ґрунтів	Порушення біохімічних процесів, загибель видів
Фізичні	Шум, вібрація, радіація, електромагнітне поле	Стресові реакції у біоти, порушення структури екосистем
Біологічні	Інвазивні види, патогени	Зміна біорізноманіття, втрата стійкості екосистем
Кліматичні	Зміна температур, опадів	Деградація середовищ існування, зниження продуктивності екосистем

Джерело: складено на основі [8, 11, 13]

Таблиця 2

Характер впливу шуму на біоту та людину

Об'єкт впливу	Основні прояви	Довгострокові наслідки
Людина	Втома, дратівливість, гіпертонія	Серцево-судинні хвороби, зниження слуху
Тварини	Дезорієнтація, порушення комунікацій	Міграція, скорочення популяцій
Рослинність	Зменшення фотосинтезу, порушення росту	Зниження продуктивності, деградація біоценозів

Джерело: складено на основі [12, 14, 15]

Таблиця 3

Класифікація територій за рівнем шумового навантаження

Рівень навантаження	Діапазон шуму, дБА	Характеристика територій
Допустимий	До 55	Житлові та рекреаційні зони з належним шумозахистом
Помірний	56–65	Проміжні зони між житловими і транспортними артеріями
Підвищений	66–75	Виробничі території, ділянки біля автошляхів
Критичний	Понад 75	Промислові вузли, транспортні магістралі, аеропорти

Джерело: складено на основі [9, 11, 14]

тивних рівнів шуму, що визначаються санітарними нормами та стандартами для різних типів територій. Соціоекологічний підхід розглядає шум як чинник, що впливає не лише на фізичний стан людини, але й на її психологічний комфорт, якість життя та соціальну поведінку. Геоєкологічний підхід, своєю чергою, забезпечує можливість просторового аналізу взаємозв'язків між джерелами шуму, ландшафтними особливостями території та природними компонентами, формуючи базу для прийняття управлінських рішень у сфері екологічного планування.

У нормативному полі України ключовим документом залишається ДСН 3.3.6.037–99 «Державні санітарні норми допустимих рівнів шуму», який визначає гранично допустимі рівні шуму для житлових, рекреаційних, промислових та транспортних зон [19–20]. У європейській практиці регулювання базується на Директиві ЄС 2002/49/EC (Environmental Noise Directive), що встановлює основи моніторингу, шумового картографування та планування заходів для зниження акустичного навантаження. Водночас у США діє National Environmental Policy Act (NEPA), яка передбачає проведення процедур Environmental Impact Assessment (EIA) із врахуванням акустичних параметрів територій [21–22]. Таким чином, міжнародна практика свідчить про тенденцію інтеграції шумових показників у систему екологічного управління.

Для комплексного аналізу стану акустичного середовища застосовуються інтегральні індекси, зокрема Noise Exposure Index (NEI) та Acoustic Ecological Index (AEI), що поєднують фізичні вимірювання шуму з оцінкою його екологічних та соціальних наслідків. Використання таких індикаторів дозволяє не лише визначати ступінь акустичного забруднення, але й порівнювати рівень шумового впливу між територіями та відстежувати його динаміку в часі. Розроблення інтегральних індексів створює підґрунтя для включення акустичних показників у ширшу систему екологічного аудиту та стратегічного планування охорони довкілля [23–25].

Сучасні цифрові технології, насамперед геоінформаційні системи (ГІС), відкривають нові можливості для дослідження акустичного середовища. Створення інтерактивних шумових карт дає змогу візуалізувати просторову диференціацію шумових полів, визначати зони перевищення нормативів та моделювати сценарії зниження шумового навантаження. Такі рішення ефективно підтримують процеси екологічного планування, містобудування та стратегічної екологічної оцінки.

В Україні розвиток цифрового екологічного моніторингу реалізується через національну платформу «ЕкоСистема», яка забезпечує інтеграцію даних із різних джерел, у тому числі з акустичними показниками. Створення шумових карт, баз даних і цифрових панелей спостереження у межах цієї системи дає

змогу відстежувати зміни шумового фону в динаміці, визначати території ризику та формувати обґрунтовані управлінські рішення на національному й регіональному рівнях.

Розроблення геоєкологічних карт шумового забруднення, впровадження індексного аналізу акустичного середовища та створення інтегрованих баз даних є ключовими кроками у вдосконаленні системи екологічного моніторингу України. Вважаємо, що це сприятиме підвищенню ефективності державної екологічної політики, гармонізації національних стандартів із міжнародними вимогами та зміцненню аналітичного потенціалу у сфері управління якістю довкілля.

Головні висновки. Проведене дослідження дозволило узагальнити теоретичні засади оцінки екологічності довкілля за показниками акустичного навантаження та виявити ключові напрями вдосконалення системи моніторингу цього виду забруднення.

У результаті аналізу наукових підходів встановлено, що поняття екологічності довкілля має багатовимірний характер і розглядається у трьох основних концептуальних площинах – антропоцентричній, еколого-ландшафтній та геоєкологічній. Кожен із підходів формує власні критерії оцінки стану середовища, але всі вони сходяться на розумінні екологічності як інтегрального показника, що відображає ступінь гармонійності взаємодії людини з природою.

Доведено, що шумове навантаження є одним із ключових фізичних чинників, які знижують екологічність природного середовища. Його вплив проявляється на різних рівнях – від фізіологічних реакцій людини та тварин до трансформацій екосистемних структур і процесів. Надмірний шум порушує комунікаційні механізми живих організмів, змінює просторову поведінку біоти, спричиняє зниження біорізноманіття, а в урбанізованих просторах – зменшує показники екологічного комфорту населення.

Встановлено, що оцінка екологічності довкілля повинна враховувати акустичний компонент як невід'ємну складову комплексного екологічного моніторингу. Методологічно доцільно інтегрувати показники шумового забруднення до існуючих систем екологічної оцінки через формування інтегральних індексів шумового навантаження (Noise Exposure Index, Acoustic Ecological Index), адаптованих до національних умов.

Перспективи використання результатів дослідження. Подальші дослідження мають бути спрямовані на практичну реалізацію системи моніторингу акустичного навантаження в межах державної екологічної платформи «ЕкоСистема», що забезпечить можливість просторово-часового аналізу шумових полів, розроблення шумових карт, створення баз даних та підвищення ефективності екологічного управління.

Література

1. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12>.
2. Environmental Noise Guidelines for the European Region. Copenhagen : WHO Regional Office for Europe, 2018. URL: <https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region-2018>.
3. Environmental noise in Europe – 2023. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe-2023>.
4. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities*. 2002. L 189. P. 12–25. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0049>.
5. Fernandez L. P. S. Environmental noise indicators and acoustic indexes based on fuzzy modelling for urban spaces. *ResearchGate*. 2021. URL: <https://www.researchgate.net/publication/350749351>.
6. Morillas J. M. B., Montes González D., Vilchez-Gómez R., Rey-Gozalo G. Estimation of the Occurrence and Significance of Noise Effects on Pedestrians Using Acoustic Variables Related to Sound Energy in Urban Environments. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, Iss. 23. Art. 11212. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142311212>.
7. Wosniacki G. G., Zannin P. H. T. Framework to manage railway noise exposure in Brazil based on field measurements and strategic noise mapping at the local level. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 757. Art. 143721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143721>.
8. Barrigón Morillas J. M., Montes Gonzalez D., Gómez Escobar V., Rey Gozalo G., Vilchez-Gómez R. A proposal for producing calculated noise mapping defining the sound power levels of roads by street stratification. *Environmental Pollution*. 2021. Vol. 270. Art. 116080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116080>.
9. Montes González D., Barrigón Morillas J. M., Rey-Gozalo G. Effects of noise on pedestrians in urban environments where road traffic is the main source of sound. *Science of The Total Environment*. 2023. Vol. 857. Art. 159406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159406>.
10. Решетченко А. І., Борсук А. І., Вергелес Ю. І. Аналіз існуючих нормативів країн ЄС порівняно із вимогами українського законодавства в сфері шумового навантаження в урбоекосистемі. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2019. № 2 (20). С. 16–23.
11. Дяченко Т. О., Євчук В. М. Аналіз впливу транспортного шуму на навколишнє середовище та людину. *Економіка та управління на транспорті*. 2018. Вип. 6. С. 125–131.
12. Васенко О. Г., Верніченко-Цветков Д. Ю., Колесник А. М., Лунгу М. Л. Результати комплексного екологічного моніторингу довкілля під час експлуатації глибоководного суднового ходу р. Дунай-Чорне море у 2017 році. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 10–14 верес. 2018 р.). Харків: УКРНДІЕП, 2018. С. 87–91.
13. Шарапова С. В. Реформування державної системи моніторингу довкілля в Україні. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2023. № 4. С. 408–413. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2023.04.40>.
14. Гриценко А. В., Васенко О. Г., Карлюк А. А. Основні положення Національної Доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2022 році. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XIX Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 14–15 верес. 2023 р.). Харків: УКРНДІЕП, 2023. С. 3–4.
15. Національна екологічна платформа «ЕкоСистема». *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. URL: <https://eco.gov.ua> (дата звернення: 20.05.2026).
16. Варламова І. С. Теоретичні підходи до визначення поняття «екологічна безпека». *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*. 2017. Вип. 23, ч. 2. С. 161–164.
17. Деревська К., Руденко К., Шевчук М., Мирижук Є. Оцінка екологічного стану навколишнього середовища Іллінецької імпактної структури. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Геологія*. 2022. Вип. 3. С. 66–72. DOI: <https://doi.org/10.17721/1728-2713.98.08>.
18. Leonenko A. V., Krupskaya L. T., Usikov V. I., Bubnova M. Geocological assessment and environmental monitoring within the boundaries of the impact of the development of gold deposits using GIS technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1061, Iss. 1. Art. 012016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1061/1/012016>.
19. Норми допустимих рівнів шуму у приміщеннях житлових і громадських будівель та на території житлової забудови : ДСН 3.3.6.037–99. *Верховна Рада України*. URL: <https://zakon.isu.net.ua/document/view/dsn336037-99>.
20. Про екологічний моніторинг : проєкт Закону України (2023). *Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України*. URL: <https://mepr.gov.ua>.
21. Regulation (EC) No 1367/2006 of the European Parliament and of the Council on the application of the Aarhus Convention to Community institutions and bodies. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006R1367>.
22. National Environmental Policy Act (NEPA), 1969. *United States Environmental Protection Agency*. URL: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-national-environmental-policy-act>.
23. Environmental, Health, and Safety Guidelines. *International Finance Corporation*. URL: <https://www.ifc.org>.
24. Шумові дослідження та прилади для акустичного моніторингу. *Center-LTD*. URL: <https://center-ltd.com.ua>.
25. Environmental Noise – Emerging Issues. United Nations Environment Programme (UNEP). URL: <https://www.unep.org>

Дата першого надходження статті до видання: 25.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

НАВЧАЛЬНИЙ КЕЙС ЯК ІНСТРУМЕНТ ФОРМУВАННЯ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Терещенко Н.Ю.

Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ
scientific.lab2025@gmail.com

У роботі розроблено методичні матеріали навчального кейсу студентського наукового гуртка «Еколабораторія: хімія рослин», спрямованого на інтеграцію хімічних знань із екологічними принципами озеленення та формування компетентностей сталого розвитку у студентів освітньої програми «Ландшафтний дизайн». Задачею запропонованого кейсу є створення ціннісно орієнтованого освітнього середовища, у якому студенти набувають дослідницьких, аналітичних та комунікативних компетентностей, що забезпечує їх готовність до розв'язання екологічних питань засобами майбутньої професійної діяльності. Кейс містить форми навчальної діяльності: роботу з літературними джерелами, виконання лабораторних експериментів, дискусії, міні-проекти. Запропонована багатокомпонентна структура кейсу забезпечує інтеграцію теоретичних знань і практичних навичок, формує здатність студентів до самостійного пошуку інформації, аргументованого обговорення та прийняття екологічно відповідальних рішень. Ознайомлення студентів із класифікацією хімічних речовин та прикладами мінеральних добрив, нормами їх внесення відповідно до агротехнічних регламентів формує ресурсозберігаючу компетентність. Вивчення принципів приготування розчинів різної концентрації, зокрема робочих розчинів для підживлення та методів розбавлення концентрованих препаратів, сприяє розвитку аналітичної компетентності та навичок раціонального використання ресурсів. Вибір ґрунтових субстратів, сформованих на основі торфу, піску та перліту з додаванням деревного вугілля як сорбенту та регулятора кислотності, забезпечує формування практико-орієнтованої компетентності та здатності приймати науково обґрунтовані рішення щодо оптимального водно-повітряного режиму та убезпечення втрати родючості ґрунту через його засолення. Такий підхід сприяє розвитку навичок екологічного мислення, інтеграції знань із хімії, біології та агрономії, а також формує у студентів відповідальність за сталий вибір технологій у сфері озеленення та ландшафтного дизайну. Розробка режимів поливу декоративних культур із застосуванням крапельного зрошення та фертигації спрямована на підтримання стабільного мікроклімату у зоні зелених насаджень, сприяє екологічній рівновазі та підвищує якість озеленення територій міських осередків, формуючи компетентність екологічної відповідальності. Розгляд хімічних аспектів екологічного озеленення здійснено на прикладі троянд (*Rosa L.*), що дозволяє студентам інтегрувати професійні знання з практиками сталого розвитку та розвивати дослідницьку компетентність, необхідну для майбутньої професійної діяльності у сфері ландшафтного дизайну. *Ключові слова:* навчальний кейс, педагогічні умови, екологічна освіта, компетентності сталого розвитку, ландшафтний дизайн, студентський науковий гурток.

Educational case as an instrument for developing sustainable development competences. Tereshchenko N.

The study developed methodological materials for a learning case within the student scientific club «Eco-laboratory: Chemistry of Plants», aimed at integrating chemical knowledge with ecological principles of greening and at fostering sustainable development competences among students of the «Landscape Design» educational program. The aim of the proposed case is to create a value-oriented educational environment in which students acquire research, analytical, and communicative competencies, ensuring their readiness to address environmental issues through their future professional activities. The case incorporates diverse learning practices such as working with literature sources, conducting laboratory experiments, engaging in discussions, and developing mini-projects. This multi-component structure ensures the integration of theoretical knowledge and practical skills, fostering students' ability to independently search for information, participate in reasoned discussions, and make environmentally responsible decisions. Guiding students through the principles of chemical substance classification and examples of mineral fertilizers, as well as with the norms of their application according to agrotechnical regulations, fosters biochemical competence and resource-saving competence. Studying the principles of preparing solutions of different concentrations, including working solutions for fertilization and methods of diluting concentrated preparations, contributes to the development of analytical competence and skills of rational resource use. The choice of soil substrates based on peat, sand, and perlite with the addition of charcoal as a sorbent and acidity regulator ensures the formation of practice-oriented competence and the ability to make scientifically grounded decisions regarding optimal water-air regimes and preventing soil fertility loss due to salinization. This approach promotes the development of ecological thinking skills, the integration of knowledge from chemistry, biology, and agronomy, and fosters students' responsibility for sustainable choices of technologies in landscaping and landscape design. The development of irrigation regimes for ornamental plants using drip irrigation and fertigation is aimed at maintaining a stable microclimate in green areas, contributing to ecological balance and improving the quality of landscaping in urban environments, thereby forming ecological responsibility competence. The consideration of chemical aspects of ecological landscaping is carried out on the example of roses (*Rosa L.*), which enables students to integrate professional knowledge with sustainable development practices and to develop research competence necessary for future professional activity in the field of landscape design. *Key words:* educational case, pedagogical conditions, environmental education, sustainable development competences, landscape design, student scientific club.



Постановка проблеми. Глобальні виклики, окреслені у Цілях сталого розвитку ООН, залишаються одними із ключових орієнтирів державної політики та відображені у змісті сучасної педагогічної практики. Згідно з даними Звіту про сталий розвиток 2025 (Sustainable Development Report 2025), підготовленого міжнародною дослідницькою мережею у сфері сталого розвитку (Sustainable Development Solutions Network, SDSN) під керівництвом Джеффрі Д. Сакса, Україна посідає 42-ге місце серед 167 країн із загальним балом 75,7 [1]. Такий результат свідчить про відносно високий рівень залученості держави до процесів реалізації Цілей сталого розвитку. Водночас Звіт ООН за 2025 рік наголошує, що світ перебуває на критичному етапі реалізації Повістки дня щодо реалізації Цілей сталого розвитку до 2030 року. Попри значні досягнення у сфері охорони здоров'я, освіти та доступу до інфраструктури, темпи прогресу залишаються недостатніми [2]. Така ситуація актуалізує потребу в інтенсифікації поширення інформації щодо Цілей сталого розвитку, серед яких значна частина присвячена екологічним питанням. Це сприяє підвищенню рівня поінформованості суспільства та формуванню здатності діяти задля досягнення відповідних цілей, інтегруючи екологічні рішення у всі галузі людської діяльності. Зокрема, галузь ландшафтного дизайну має безпосередній вплив на створення сприятливого еко-середовища, що є важливим чинником забезпечення екологічної безпеки у контексті зміни клімату. Формування компетентностей сталого розвитку у фахівців ландшафтного дизайну передбачає інтеграцію хіміко-екологічних знань у професійну підготовку.

Актуальність дослідження. Для сучасних фахівців у галузі ландшафтного дизайну важливим є прийняття науково-обґрунтованих та раціональних рішень, що забезпечують їх професійний внесок у сферу озеленення, створення стійких еко-систем у міському й сільському середовищі. Така діяльність ґрунтується на формуванні здатності інтегрувати професійні знання з екологічними принципами сталого розвитку. Робота майбутніх ландшафтних дизайнерів передбачає впровадження екологічно безпечних технологій, оптимізацію використання природних ресурсів і створення просторів, які підтримують біорізноманіття та відповідають сучасним викликам зміни клімату. У цьому контексті актуалізується завдання освіти щодо підготовки відповідних фахівців.

Для України це питання особливо важливе у зв'язку з гармонізацією освітніх програм із європейськими стандартами та необхідністю забезпечення екологічної безпеки в умовах урбанізації, кліматичних змін та війни [3, 4]. Наукові публікації українських авторів підкреслюють значення екологічної освіти як основи формування екологічної культури та відповідального ставлення до довкілля [5, 6]. Міжнародні

дослідження, індексовані у Scopus, акцентують на необхідності розвитку міждисциплінарних компетентностей, що поєднують аналітичні, дослідницькі та комунікативні навички [7,8]. Ефективне навчання зеленої хімії потребує інтеграції педагогічних знань про зміст із практичними дослідницькими підходами та комунікативними стратегіями, що забезпечує формування цілісних професійних компетентностей майбутніх учителів [7]. Автори наголошують, що міждисциплінарність у підготовці педагогів є ключовою умовою для реалізації освітніх практик у контексті сталого розвитку. У свою чергу, застосування підходу Наука – Технології – Суспільство – Довкілля (Science-Technology-Society-Environment (STSE)) у викладанні хімії сприяє розвитку екологічної свідомості здобувачів освіти, формуванню критичного мислення та інтеграції знань із реальними соціальними й екологічними проблемами [8]. У школах та вищих навчальних закладах важливу роль у формуванні компетентностей сталого розвитку відіграють тематичні заходи та наукові гуртки екологічної тематики, які створюють додатковий освітній простір для формування компетентностей сталого розвитку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика дослідження відповідає державній освітній політиці у сфері впровадження принципів сталого розвитку та формування екологічної культури майбутніх фахівців. Робота узгоджується з положеннями Закону України «Про освіту» та Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» [9, 10]. Дослідження безпосередньо спрямоване на реалізацію певних стратегічних цілей висвітлених у Стратегії розвитку вищої освіти в Україні на 2021-2031 роки, а саме: навичок системного та екологічності мислення, міжгалузевої комунікації [11]. Практична значущість результатів узгоджується із положеннями Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» [12]. Особливе значення має формування за допомогою розробленого еко-кейсу у здобувачів освіти, майбутніх фахівців ландшафтного дизайну, здатності виконувати завдання високої складності ґрунтуючись на наукових знаннях, планувати навантаження, концентруватися під час діяльності, управляти власними емоціями [3, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття дослідження та практика у сфері вищої освіти для сталого розвитку набули значного поширення. В університетських навчальних програмах українських закладів вищої освіти, як правило, уже впроваджено компетентнісний підхід. Якість професійної підготовки фахівців визначається рівнем сформованості їхньої професійної компетентності, що передбачає не лише засвоєння теоретичних знань, а й розвиток умінь та навичок, здатних до практичного застосування у професійній діяльності [13, 14]. До компетентно-

стей сталого розвитку належать системне мислення як здатність усвідомлювати взаємозв'язки між природними, соціальними та економічними процесами, прогностична компетентність (здатність передбачати наслідки рішень і сценарії майбутнього), нормативна компетентність (орієнтація на цінності та етичні принципи сталості), стратегічна компетентність (уміння розробляти й упроваджувати стратегії розвитку), аналітична компетентність (оцінка екологічних ризиків та ефективності технологій), дослідницька компетентність (планування й проведення експериментів, робота з даними), ресурсозберігаюча компетентність (раціональне використання природних ресурсів), компетентність екологічної відповідальності (усвідомлення соціальної значущості екологічних рішень), комунікативна компетентність (аргументоване представлення результатів, робота в команді, участь у дискусіях), компетентність критичного мислення (здатність аналізувати інформацію та приймати обґрунтовані рішення), креативність та інноваційність (пошук нових підходів до вирішення проблем), а також глобальна громадянська компетентність (розуміння міжнародних викликів і відповідальності за глобальні процеси) [15, 16].

Аналіз літературних джерел засвідчує, що у сучасному науково-педагогічному дискурсі екологічна освіта розглядається як багатовимірний процес, що поєднує формування зазначених компетентностей сталого розвитку із застосуванням різних педагогічних підходів, спрямованих на розвиток критичного мислення, соціальної відповідальності, аналітичних та дослідницьких умінь, а також на інтеграцію ціннісних орієнтацій і глобальної громадянської свідомості [17]. У сучасному міжнародному контексті в основу освітніх стратегій покладено концепцію освіти впродовж життя та орієнтацію на мобільність ринку праці. Важливо зазначити, що сучасні педагогічні підходи спрямовані не лише на засвоєння знань, а й на формування у студентів щоденної екологічної відповідальності, яка проявляється у здатності брати участь у екологічних ініціативах та усвідомлювати причини й наслідки екологічних ризиків [3, 18]. Метою роботи є розроблення методичних матеріалів навчального кейсу студентського наукового гуртка «Еколабораторія: хімія рослин», спрямованого на інтеграцію хімічних знань із екологічними принципами озеленення та формування компетентностей сталого розвитку у студентів освітньої програми «Ландшафтний дизайн».

Матеріали та методика дослідження. Матеріали дослідження розроблено у вигляді методичного комплексу, що поєднує теоретичні, практичні та дослідницькі елементи. До його складу входять навчально-методичні матеріали (літературні джерела, конспекти занять, інструктивні та інформативні картки, методичні рекомендації), а також практичні завдання у формі лабораторних експериментів із дослідження хімічних властивостей модельних

систем хімічних речовин, що застосовуються в процесі озеленення територій за допомогою троянд (Rosa L.). Рекомендована літературна база включала добірку наукових праць, нормативних документів та екологічних стандартів, що використовувалися для аналітичної роботи студентів і наукових дискусій. Важливою складовою частиною комплексу стали рефлексивні завдання, спрямовані на висвітлення сформованості навичок обґрунтування та прийняття фахових, науково-практичних рішень у контексті сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Літературні джерела, рекомендовані студентам для опрацювання, спрямовано на систематизацію їх теоретичних знань із хімії та екології, розвитку системного мислення та міждисциплінарних зв'язків. Опрацювання результатів науково-дослідних робіт щодо вирощування троянд, висвітлених у публікаціях та нормативних документах, сприяло поглибленню усвідомлення студентами взаємозв'язків між хімічними властивостями речовин та ефективністю процесів вирощування рослин (Таблиця 1). Запропонована навчальна діяльність забезпечує адаптацію студентів до наукової роботи, поступову інтеграцію знань із хімії, біології та агрономії, формує аналітичне мислення й екологічну відповідальність, а також підвищує готовність до застосування наукових результатів у практиці сталого озеленення на прикладі вирощування троянд (Rosa L.) [19-21].

Конспекти занять, що містили класифікацію хімічних речовин, приклади добрив та їх агротехнічні регламенти, формували ресурсозберігаючу компетентність, прогностичну компетентність, оскільки студенти навчалися передбачати наслідки застосування різних технологій живлення рослин та моделювати сценарії їх впливу на довкілля.

Вивчення принципів приготування розчинів різної концентрації має багатопланове значення для формування компетентностей студентів. Передусім це поглиблення базових хімічних понять: концентрація, молярність, масова частка, співвідношення «концентрат-розчинник». Опанування цих принципів вимагає точних розрахунків, уважності до деталей та перевірки правильності власних дій, що безпосередньо розвиває аналітичну компетентність. Практичне приготування робочих розчинів для підживлення та розбавлення концентрованих препаратів має педагогічну мету – студенти не лише виконують алгоритм, а й усвідомлюють його значення та наслідки на рослинний організм та ґрунт. Це формує дослідницькі навички та вміння застосовувати теоретичні знання у реальних умовах. Розуміння кількісних та якісних характеристик розчинів формує навичку раціонального використання ресурсів, безпечного поводження з хімічними препаратами та екологічної відповідальності. Процес приготування розчинів під час лабораторних робіт у підгрупах стимулює комунікативні компетентності, формує

Таблиця 1

Формування компетентностей сталого розвитку у процесі роботи з літературними джерелами

Літературні джерела	Педагогічна функція	Формування компетентностей
Наукові публікації (статті, тези, доповіді, монографії)	Створення навчального середовища, яке формує в студентів навички академічного пошуку, критичного аналізу та систематизації знань. Забезпечення розвитку уміння аргументовано обґрунтовувати результати досліджень, висновки, інтегрувати хімічні знання із екологічними наслідками. Застосовувати академічні знання для вирішення професійних завдань. Виховувати навички академічної доброчесності й орієнтувати студентів на використання перевірених джерел.	Аналітична компетентність, критичне та системне мислення, дослідницька компетентність, інтеграційна компетентність, комунікативна компетентність
Нормативні документи (агротехнічні регламенти, стандарти, інструкції)	Орієнтація студентів на дотримання агротехнічних регламентів та екологічних стандартів. Формування розуміння норм внесення добрив, правил екологічного контролю та безпечного використання ресурсів. Виховання ціннісних орієнтацій, відповідальності за наслідки професійних рішень і здатності прогнозувати їхній вплив на довкілля.	Нормативна компетентність, прогностична компетентність, екологічна відповідальність, ціннісно-орієнтована компетентність

навички співпраці, аргументації вибору, пояснення власних рішень, узгодження дій.

Розгляд оптимального хімічного складу та фізичних параметрів ґрунту, що забезпечують доступність поживних елементів і стабільність водно-аераційного режиму, формує у студентів розуміння причинно-наслідкових зв'язків між властивостями субстрату та агрономічними результатами. Це дозволяє пояснити, чому саме параметри насипної щільності, пористості, кислотності та електропровідності визначають інтенсивність росту, декоративність і продуктивність рослин. В роботі було розглянуто та детально проаналізовано результати дослідження десяти зразків ґрунту: ґрунт без добавок (контрольний зразок (КЗ) та дев'яти субстратних сумішей, створених шляхом змішування у різних співвідношеннях трьох компонентів (перегнаних кукурудзяних стебел, перегнилого субстрату грибів шийтаке та перліту) [22]. Контрольний ґрунт характеризувався високою насипною щільністю ($1,28 \text{ г/см}^3$) та низькою пористістю (47,38%), що обмежувало розвиток кореневої системи і призводило до гірших агрономічних показників (менша висота, тонше стебло, менша площа листків і кількість квіток). Натомість субстратні суміші забезпечували оптимальний діапазон щільності ($0,57\text{--}0,74 \text{ г/см}^3$) та пористості (54,33–71,48%), що сприяло кращому проникненню коренів, активнішому газообміну та підвищенню вологоутримувальної здатності. Кислотність субстратів (рН 6,51–7,10) забезпечувала оптимальну доступність макро- та мікроелементів, а електропровідність ($\geq 0,27 \text{ мілімхо/см}$) свідчила про вищу поживну цінність сумішей порівняно з контрольним ґрунтом. Хімічний склад субстратів варіювався за вмістом азоту (110–155 мг/кг), фосфору (50–85 мг/кг) та калію (250–450 мг/кг), що дозволяло моделювати різні сценарії живлення рослин. Найбільш ефектив-

ними для вирощування троянд виявилися суміші з 70% кукурудзяних стебел, 15% грибного субстрату та 15% перліту, які забезпечували інтенсивний ріст, розвиток і високу продуктивність рослин. Узагальнені результати порівняння контрольного ґрунту та субстратних сумішей наведено у Таблиці 2, яка демонструє опрацьовані студентами ключові фізико-хімічні параметри ґрунту.

Зміст інструктивних карток у навчальному процесі був побудований так, щоб студенти отримували чіткий алгоритм виконання лабораторних експериментів, перелік необхідних реактивів та обладнання, а також методи визначення ключових показників, що мають значення для живлення рослин.

До складу методичного комплексу входять три типи інформативних карток (ІК): розроблені викладачем, створені студентами та підготовлені у форматі спільної роботи (викладач-студент). Кожен із цих типів ІК має певну педагогічну функцію, оскільки задіює різні підходи формування компетентностей сталого розвитку. Картки, укладені викладачем, відзначаються нормативною чіткістю й аналітичною системністю, наданий викладачем матеріал демонструє приклад структурування інформації, формує у студентів уміння працювати з достовірними джерелами, критично осмислювати матеріал і дотримуватися принципів академічної доброчесності. Картки, створені студентами стимулюють самостійний пошук, розвивають дослідницькі навички та креативність. У процесі їх підготовки студенти навчаються відбирати й систематизувати професійну інформацію, інтегрувати знання з різних дисциплін, аргументовано представляти результати та співвідносити їх із практичними завданнями. Це сприяє формуванню інтеграційної та комунікативної компетентностей, а також компетентності екологічної відповідальності. Студенти усвідомлюють

Таблиця 2

Фізико-хімічні параметри контрольного ґрунту та субстратні суміші

Показник	Одиниця виміру	Контрольний ґрунт (КЗ)	Субстратні суміші
Насипна щільність	г/см ³	1,28	0,57-0,74
Загальна пористість	%	47,38	54,33-71,48
pH	одиниці pH	7,12	6,51-7,10
Електропровідність	мілімхо/см	0,25	≥0,27
Гідролізований азот	мг/кг	113,87	110-155
Доступний фосфор	мг/кг	48,51	50-85
Доступний калій	мг/кг	243,61	250-450

Таблиця 3

Інформативна картка «Мінеральні добрива»

Приклад речовини	Поживні елементи	Норми внесення	Агротехнологічне значення
Аміачна селітра (NH ₄ NO ₃ , ω _N ≈ 34%)	Азот	250–300 кг/га	Стимулює ріст зеленої маси
Нітроаммофос (N ₁₆ P ₁₆ K ₁₆)	Азот, фосфор, калій	300 кг/га	Забезпечує збалансоване живлення
Суперфосфат простий (Ca(H ₂ PO ₄) ₂ , 19% P ₂ O ₅)	Фосфор	200 кг/га	Сприяє розвитку кореневої системи, стимулює цвітіння.
Калій хлорид (KCl, 60% K ₂ O);	Калій	150 кг/га	Підвищує стійкість до посухи та морозів, покращує якість квітів.
Сульфат цинку (ZnSO ₄ , ω _{Zn} ≈ 34%)	Цинк	1–3 кг/га	Забезпечують формування квіткових органів, підвищує стійкість до хвороб.

наслідки фіксування у картці інформації на основі котрої під час лабораторних робіт та дискусій, вони будуть обґрунтовувати та впроваджувати агротехнологічних рішення для довкілля. Спільні картки, де частину матеріалу готує викладач, а частину студенти, поєднують переваги обох підходів і створюють навчальне середовище співпраці. Такий формат формує компетентності партнерства, критичного мислення та ціннісно-орієнтованої відповідальності, адже студенти навчаються не лише відтворювати знання, а й брати участь у колективному виробленні освітнього продукту, оцінювати наслідки рішень та співставляти їх із принципами сталого розвитку. У комплексі три типи інформативних карток сприяють формуванню ключових компетентностей сталого розвитку: аналітичної, дослідницької, інтеграційної, комунікативної, нормативної, екологічної відповідальності, партнерства та ціннісно-орієнтованої. Запропонована форма роботи формує готовність студентів діяти професійно й відповідально в умовах сучасних викликів, інтегруючи академічні знання з практичними завданнями та екологічними пріоритетами.

Виконання лабораторного експерименту розпочиналося після повторення правил Техніки безпеки роботи у хімічній лабораторії. Експериментальна частина кейсу організована за допомогою інструкцій, викладених в інструктивних картках, що нада-

вало студентам можливість здійснювати предметні дії та візуалізувати теоретичні положення щодо складу агрохімікатів, їх діючих форм і вмісту поживних елементів. Виявлення поживних хімічних елементів здійснено за допомогою якісних реакцій, утворенні продукти реакції мали специфічні характеристики. Так, наприклад, для якісного аналізу азотвмісних добрив студенти виконували реакції, що дозволяли підтвердити наявність азоту як у катіоні амонію, так і в аніоні нітрату. При виявленні катіону амонію відбувалася реакція $\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3\uparrow$, у результаті якої виділяється газ аміак із різким характерним запахом. Також студенти підтверджували властивості та склад утвореного газу в результаті взаємодії з індикаторами. Контакт газуватого продукту реакції із змоченою у воді смужкою лакмусового паперу спричиняв утворення синього забарвлення індикаторного паперу, що пов'язано зі зміною pH (утворенням лужного середовища). Візуальний ефект підтверджував основний характер газуватої речовини та перебіг хімічної реакції $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{OH}$. Застосований дослід мав важливе педагогічне значення, адже студенти не лише фіксували одразу наявний ефект реакції – виділення газу, а й усвідомлювали додаткові причинно-наслідкові зв'язки між хімічними перетвореннями та властивостями речовин, що формувало їхню дослідницьку компетентність, аналітичне мислення. Для виявленні

Приклад методичних рекомендацій «Системи зрошення»

Тези теоретичних положень розділу.

Принцип роботи крапельного зрошення. Крапельний полив забезпечує рівномірне зволоження ґрунту завдяки подачі води безпосередньо у кореневу зону рослини. Вода надходить малими порціями через систему трубок і крапельниць, що дозволяє уникати надмірного зволоження поверхні ґрунту та зменшувати випаровування. Контроль витрат води здійснюється через регулятори тиску та дозатори, що дає можливість точно визначати кількість води для кожної рослини. Це створює стабільний мікроклімат, знижує ризик розвитку хвороб, пов'язаних із надмірною вологістю, та сприяє економії ресурсів. Рекомендовані літературні джерела: [23-25].

Порівняння з традиційним зрошенням. У порівнянні із традиційним зрошенням крапельний метод дозволяє зменшити витрати води на 30-50%, забезпечує більш ефективне використання добрив (фертигація), що також має економічний ефект, оскільки знижує витрати. Рекомендовані літературні джерела: [24,26,27].

Завдання самостійної роботи студентів. Опишіть щонайменше два методи зрошення з позиції раціонального використання води. Які аспекти процесу зрошення можуть забезпечувати ефективне використання добрив та зменшення екологічного навантаження на довкілля.

аніону нітрату до розчину додано сульфатну кислоту та мідну стружку, дослід проводиться під витяжною шафою, в результаті нагрівання відбувається окисно-відновна реакція $4\text{NaNO}_3 + 4\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Cu} \rightarrow 4\text{NaHSO}_4 + \text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NO}_2\uparrow$. Газуватий продукт реакції діоксид нітрогену (бурий газ) має характерний запах що підтверджує наявність нітратів у складі добрив.

Методичні рекомендації, розроблені в роботі, орієнтують студентів на прийняття науково обґрунтованих рішень у сфері озеленення, формують стратегічну компетентність, навчають впроваджувати довгострокові стратегії сталого розвитку у практиці ландшафтного дизайну [23-27]. Водночас вони стимулюють креативність та інноваційність, адже студенти мають можливість пропонувати інноваційні підходи, наприклад щодо оптимізації режимів зрошення (Таблиця 4).

Із аналізу змісту методичних рекомендацій (Таблиця 4) можна зробити висновок, що розроблені дидактичні матеріали виконують функцію закріплення та поглиблення теоретичних знань, є прикладом ознайомлення із досягненнями науковців щодо вибору технологій та оцінки їх екологічних та економічних наслідків. Завдання самостійної роботи студентів розвивають креативність та інноваційність, надають простір для наукового обґрунтування власних думок.

Головні висновки. У статті представлено дидактичні матеріали навчального кейсу студентського наукового гуртка «Еколабораторія: хімія рослин» як інструменту інтеграції хімічних знань із екологічними принципами озеленення для формування компетентностей сталого розвитку у студентів освітньої програми «Ландшафтний дизайн». Кейс базується на комплексі навчальних об'єктів, що ознайомлюють студентів з умовами вирощування троянди (*Rosa L.*) як широко відомої декоративної культури та відповідними агрохімічними чинниками її культивування (добрива, ґрунтові субстрати, системи зрошення). Така інтегрована модель методичних матеріалів ґрунтується на хіміко-екологічних аспектах озеленення й забезпечує формування компетентностей сталого розвитку у сфері ландшафтного дизайну.

Перспективи використання результатів досліджень. Навчальний кейс та заняття студентського наукового гуртка посилюють екологічне спрямування фахової освіти. Додаткова увага студентів до сучасних наукових досліджень створює умови для системного опрацювання наукової інформації, поглиблення професійних знань, розвиває відповідальність за екологічний вибір ощадливого використання ресурсів та технологій озеленення територій в умовах технічного прогресу та змін клімату.

Література

1. Financing sustainable development to 2030 and mid-century. Sustainable development report 2025 / J. D. Sachs et al. Paris: SDSN; Dublin: Dublin University Press, 2025. 492 p.
2. The sustainable development goals report 2025 / Editor: Lianne M. C. Beltran. New York: United Nations, 2025. 64 p.
3. Popova V.V., Popov V.Yu. STEM education in Ukraine's post-war reconstruction. *Гармонізація системи освіти України з європейським освітнім простором: досягнення, виклики та перспективи: зб. тез доп. VII міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 30 жовтня 2025 р.)*. Київ: ДНУ «Інститут освітньої аналітики», 2025. С. 589–592.
4. Осадча К.П., Осадчий В.В., Спірін О.М., Круглик В.С. Використання технологій змішаного та дистанційного навчання у педагогічній підготовці бакалаврів професійної освіти. *Інноваційна педагогіка*. 2022. № 46. С. 155–160.
5. Мартін А.М. Екологічна освіта в контексті сталого розвитку. *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*. 2025. Вип. 217. С. 336–339.
6. Сасенко Т., Осипенко О. Поглиблення екологічної компетентності в структурі професійної підготовки майбутніх архітекторів у закладах вищої освіти. *Вища освіта України*. 2021. № 2(81). С. 77–83.
7. Aydin Gunbatar S., Ekiz Kiran B., Boz Y., Oztay E.S. A systematic review of green and sustainable chemistry training research with pedagogical content knowledge framework: current trends and future directions. *Chemistry Education Research and Practice*. 2025. № 26. P. 34–52.

8. Gorito G., Morais C. Empowering environmental awareness through chemistry: a science-technology-society-environment-based approach to teaching acid-base reactions in 11th-grade science. *Education Sciences*. 2025. № 1(16). P. 38. DOI: 10.3390/educsci16010038.
9. Про освіту : Закон України від 5 вересня 2017 р. № 2145-VIII / Верховна Рада України. URL: Про освіту | від 05.09.2017 № 2145-VIII (дата звернення: 10.07.2026).
10. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25 червня 1991 р. № 1264-XII / Верховна Рада України. URL: Про охорону навколишнього п... | від 25.06.1991 № 1264-XII (дата звернення: 10.07.2026).
11. Стратегія розвитку вищої освіти в Україні на 2021–2031 роки : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 лютого 2020 р. № 286-р / Міністерство освіти і науки України. Київ, 2020. URL: rozvitku-vishchoi-osviti-v-ukraini-02-10-2020.pdf (дата звернення: 10.07.2026).
12. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697-VIII / Верховна Рада України. URL: Про Основні засади (страте... | від 28.02.2019 № 2697-VIII (дата звернення: 10.07.2026).
13. Алексеева Г., Тихонова Л., Антоненко О., Овсянніков О. Компетентнісний підхід у професійній освіті та інтеграція практико орієнтованих задач для розвитку сучасної особистості. *Нова педагогічна думка*. 2025. № 1. С. 81–88.
14. Зінчук Н.А. Компетентнісний підхід до організації освітнього процесу магістрів-екологів. *Вісник Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка. Педагогічні науки*. 2023. № 3. С. 118–125.
15. Lozano R., Merrill M.Y., Sammalisto K., Ceulemans K. Connecting competences and pedagogical approaches for sustainable development in higher education: a literature review and framework proposal. *Sustainability*. 2017. № 9(10). P. 1889. DOI: 10.3390/su9101889
16. Martyniuk I. Pedagogical strategies in higher education: Challenges and perspectives. *Pedagogical Studies*. 2023. № 2(12). P. 45–59.
17. Romanchuk N., Maiboroda O., Biliuk I., Savchenko O.V. Formation of science and research competence of future engineers in higher technical educational institutions. *Journal of Education and Learning (EduLearn)*. 2026. Т. 20, № 2. С. 998–1006.
18. Кочарян А.Б., Рудь А.В., Савастру Н.І. Порівняльний аналіз вищої освіти в країнах ЄС: вивчення різноманітності навчальних програм та методологій. *Вісник науки та освіти. Серії: філологія, культура і мистецтво, педагогіка, соціологія, історія та археологія*. 2024. № 2(20). С. 849–866.
19. М'ялковський Р.О., Панцирева Г.В., Безвіконний П.В. Перспективи використання троянди флорібунда в умовах Поділля. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2023. Т. 19, № 3 (103). DOI: 10.31548/dopovidi3(103).2023.014
20. Denysko I. Complex evaluation of the introduction prospects for Hulthemia hybrid roses planted in the National Dendrological Park “Sofiyivka” of the NAS of Ukraine. *Journal of Native and Alien Plant Studies*. 2025. № 21. P. 247–256.
21. Manimaran P., et al. Role of nutrients in plant growth and flower quality of rose: A review. *International Journal of Chemical Studies*. 2017. Vol. 5, № 6. P. 1734–1737.
22. Wang Y., Cao T., Li J., Zhou H., Zhang H. Study on the main physicochemical characteristics of different plant cultivation substrates and their effects on standard roses. *Plant, Soil & Environment*. 2024. Vol. 70, № 12. P. 799–808.
23. Морозов В.В. Ландшафтні меліорації: навчальний посібник. Херсон: ХДУ, 2007. 224 с.
24. Системи краплинного зрошення: навч. посібник / за ред. М.І. Ромащенко. Херсон: ОЛДІ-ПІЛЮС, 2015. 300 с.
25. Campos W.G., Almeida E.F.A., Curvelo I.C.S., Carvalho L.M., Avellar G.S. Nutrient solutions and irrigation frequency using ebb and flow subsurface system for cut flower roses cultivated in greenhouse. *Ornamental Horticulture*. 2025. № 31. e312862. DOI: 10.1590/2447-536X.v31.312862
26. Jun S.E., Shim J.S., Park H.J. Beyond NPK: mineral nutrient-mediated modulation in orchestrating flowering time. *Plants*. 2023. Vol. 12, № 18. Article 3299. DOI: 10.3390/plants12183299
27. Ma Q., Wang X., Yuan W., Tang H., Luan M. The Optimal Concentration of KH_2PO_4 Enhances Nutrient Uptake and Flower Production in Rose Plants via Enhanced Root Growth. *Agriculture (MDPI)*. 2021. Vol. 11, № 12. Article 1210. DOI: 10.3390/agriculture11121210

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

НАУКОВО-ПРАКТИЧНІ ОСНОВИ ЕКОЛОГО-ОСВІТНЬОЇ РОБОТИ У ТУРИСТСЬКО-РЕКРЕАЦІЙНИХ ДЕСТИНАЦІЯХ ТА ЗЕЛЕНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ (НА ПРИКЛАДІ ОКРЕМИХ УСТАНОВ ПЗФ МІСТА КИЄВА)

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

Досліджені особливості еколого-освітньої діяльності на території м. Києва в умовах воєнного стану в Україні. Висвітлені основні обмежуючі фактори, що вплинули на розвиток туристсько-рекреаційної індустрії в столиці за останні роки. Зазначені процедурні моменти проведення натурного дослідження дестинацій та блакитно-зеленої інфраструктури м. Києва. Відповідні локації, де вони були проведені, означені із урахуванням топографічних особливостей рельєфу та еколого-географічного стану відпочинкової інфраструктури. Зокрема, до них належать окремі природні кластери НПП «Голосіївський» – озеро Дідорівка, РЛП «Дніпровські острови»: парк Муромець, острови Передмостова Слобідка та Долобецький. Також досліджені: урочище Скарбовий ліс, алея художників, заплави р. Дніпро тощо.

Рекогносцирування місцевості супроводжувалося фотодокументуванням та координуванням природних та антропогенних ексклюзивів засобами GPS. Визначені геоінформаційні програмні засоби для гаджетів, що працюють на Android-прошивці. В публікації зроблений наголос на специфіку реалізації польових досліджень дестинацій під час повітряної тривоги та потенційні ознаки загроз для рекреантів від спуфінгу навігаційного сигналу. Визначений пріоритет в проведенні еколого-освітньої роботи, а саме – віртуальні природознавчо-пізнавальні екскурсії.

Представлена авторська світлина навігаційного стовпчика на території острова Муромець із QR-кодом, який містить цифрову інтерпретацію еколого-освітнього маршруту та його картографічне маркування. Посилання коду VR-туру також надає повну інформацію про топографію, гідрографію та екологічний стан навколишнього природного середовища. Скріншоти роботи дисплею геоінформаційного застосунку OSMAnd демонструють проєктування нових еколого-освітніх дестинацій РЛП «Дніпровські острови». Повоєнний розвиток дестинацій м. Києва включатиме показані на них урочища Подчаша, річку Бобрівня на острові Муромець та озеро Берізка на острові Передмостова слобідка. *Ключові слова:* дестинація, зелений пояс м. Києва, туристсько-рекреаційна діяльність, спуфінг, QR-код.

Scientific and practical foundations of ecological-educational work in tourist and recreational destinations and green infrastructure (based on selected of Nature Protected Areas of the city of Kyiv). Shevchenko R.

This study addresses the specific features of environmental education activities under martial law within the territory of the city of Kyiv. The article highlights the primary limiting factors that have influenced the development of the tourism and recreation industry in the capital in recent years. It outlines the procedural aspects of conducting field research on destinations and the blue-green infrastructure of Kyiv. The selection of the respective locations where the research was conducted was determined based on the topographic characteristics of the terrain and the ecological and geographical state of the recreational infrastructure. These locations included selected natural clusters of the Holosiivskyi National Nature Park (Lake Didorivka) and the Regional Landscape Park “Dnieper river islands”: Muromets Park, Peredmostova Slobidka and Dolobetskyi islands). Additionally, the Skarbovy forest tract, the Artists’ Alley, and the Dnieper river floodplains, among others, were investigated.

Terrain reconnaissance was accompanied by photographic documentation and GPS-assisted coordination of natural and anthropogenic features. Specific geographic information software tools were identified for gadgets operating on the Android-firmware. The publication emphasizes the specific challenges of conducting field research in destinations during air raid alerts, along with potential threats to recreationists arising from navigation signal spoofing. The study identifies a priority for conducting environmental education activities, namely through virtual nature and educational excursions.

An original photograph of a navigation post on Muromets island is presented, featuring a QR-code that contains a digital interpretation of the environmental education route and its cartographic marking. The VR-tour link embedded in the code also provides comprehensive information on the topography, hydrography, and environmental state of the surrounding area. Screenshots of the OsmAnd GIS application interface demonstrate the design of new environmental education destinations within the Regional Landscape Park “Dnieper river islands”. The post-war development of Kyiv’s destinations will incorporate the Podchasha tract, the Bobrivnia river on Muromets island, and lake Berizka on Peredmostova Slobidka island shown in these screenshots. *Key words:* destination, Kyiv green belt, tourism and recreation activities, spoofing, QR code.



Постановка проблеми. Воєнний стан в Україні зумовив значні обмеження перебування громадян України на територіях та акваторіях природно-заповідного фонду України (далі – ПЗФ). Найбільш популярними в останні роки для потреб туристсько-рекреаційної діяльності стали відкриті ландшафтні дестинації населених пунктів України та блакитно-зелена інфраструктура мегаполісів. Для реалізації комерційної ініціативи громадян в галузі туристичного обслуговування, проведення еколого-освітньої роботи, виникає потреба в наукових дослідженнях у сфері екологічного моніторингу рекреаційних змін довкілля, яке трансформується внаслідок антропогенного впливу.

Актуальність дослідження. Зелені насадження скверів, парків, лісопаркових зон в центральній частині та на периферії міста Києва, утворюють єдиний зелений пояс у вигляді акваторіально-територіального рекреаційного комплексу. Його контури на місцевості топографічно визначаються значними перепадами висот: яри, балки, пагорби, долини палеорусел річок, стариць-озер та штучних гідрографічних об'єктів. Територіально утворений унікальний природно-рекреаційний потенціал оздоровчо-лікувальних дестинацій Середнього Придніпров'я площею понад 16,2 тис га (це приблизно 19,3 % від усієї площі м. Києва) [4].

Відповідні туристсько-рекреаційні дестинації м. Києва складаються з окремих, але пов'язаних між собою, кластерів – установ ПЗФ: національний природний парк, регіональні ландшафтні парки, заказники, різноманітні пам'ятки природи тощо. Відповідно вони потребують детального вивчення щодо стану екологічної рівноваги під час внесення їх до еколого-освітніх стежок та природознавчих екскурсійних маршрутів природоохоронними територіями та акваторіями м. Києва.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконане в рамках проведення однойменної науково-дослідної роботи (№ держреєстрації 0126U002871). Практичне завдання НДР – окреслення екологічних ризиків під час еколого-освітньої діяльності на прикладі окремих установ ПЗФ м. Києва: Кирилівський гай (Бабин яр), паркова зона урочища Скарбовий ліс, ландшафти острова Муромець, плавні Дніпра в районі затоки Верблюд тощо.

Дослідження відповідних установ ПЗФ ґрунтується на нормативно-правовій основі державного управління природоохоронними територіями, зокрема: п. 3, ч. III «Положення про екологічну освітньо-виховну роботу установ природно-заповідного фонду» (Наказ Мінекології № 399 від 26.10.2015 р.) [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичне підґрунтя щодо рекреаційного потенціалу та менеджменту дестинацій сформовані у наукових працях Тарасової В. В., Нестерчук І. К., Ковалевської І. М., Осіпчука А. С. В них висвітлені описи кращих місць для екологічного туризму та

унікальні природні об'єкти м. Києва, представлені приклади віртуальних екскурсій [3].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на широкий опис туристсько-рекреаційних дестинацій м. Києва, потребують подальших наукових рішень проблема формулювання еколого-технічних засад реалізації еколого-освітньої роботи на прикладі окремих природоохоронних об'єктів столиці.

Новизна. Розроблені та сформульовані науково-практичні засади дослідження еколого-освітніх та туристсько-рекреаційних дестинацій м. Києва під час воєнного стану в Україні з метою управління рівнями екологічної рівноваги при організації туристичних подорожей та екскурсійної діяльності.

Методологічне або загальнонаукове значення. Полягає в імплементації програм цифровізації екологічного забезпечення проведення еколого-просвітницької роботи під час природознавчих подорожей та екскурсій-експедицій природоохоронними територіями.

Викладення основного матеріалу. Еколого-освітня діяльність на території туристсько-рекреаційних дестинацій та блакитно-зеленої інфраструктури м. Києва має обмежувальні фактори. Перш за все, це воєнний стан в Україні, що накладає заборону на відвідування лісових масивів, до яких відноситься переважна більшість площ зеленого поясу міста. Це урочища Дарницького, Голосіївського, Святошинського та Пуща-Водицького лісів із водними та суходільними екосистемами, які формують важливі туристсько-рекреаційні дестинації, що зазнають нині максимального антропогенного впливу. Він має дві складові. Військово-технічний: розташування в природних локаціях комплексів протиповітряної оборони та технологічні лінії наступальних безпілотних систем. Варто зазначити, що за таких умов відповідні дестинації стають потенційною ціллю враження. Як наслідок, можливі локальні пожежі та загоряння підстильної поверхні, що складається переважно із сухостою та торфу. Локалізація відповідних військово-технічних баз є державною таємницею, навіть на особливих природоохоронних територіях.

Друга складова обмежень випливає з першої. Це військово-технічний вплив на навколишнє природне середовище. Бойові дії патогенно впливають на заповідну флору та фауну, знижують ресурсний потенціал туристсько-рекреаційних дестинацій. Рівні потенційного забруднення також неможливо оцінити внаслідок закритості відповідних територій. Під час війни розповсюдження забруднюючих речовин у довкіллі посилюється одночасно у атмосфері, гідросфері та літосфері. Екологічний стан дестинації стає похідною від стану основних трьох складових геосфери на досліджуваній ділянці.

З еколого-рекреаційної точки зору, для потреб природознавчо-просвітницької роботи, найбільш

шого впливу зазнають водні, ґрунтові (земельні) та повітряні ресурси санаторного оздоровлення. Не випадково, що територіальна організація санаторіїв, профілакторіїв, будинків та таборів відпочинку розташовуються у чистих рекреаційних зонах Труханового острова, Пущі-Водиці, Пущі-Озерній, Кончі-Заспі, Кончі-Озерній та на периферії зеленого поясу м. Києва: містах Ірпінь, Буча, Ворзель, селища Клавдієво (на захід від столиці) та курорт Пірнове (неподалік Київського водосховища) тощо.

Варто також привернути увагу на руйнування екосистем не заповідного природного фонду м. Києва, які ще нещодавно викликали інтерес як об'єкти еколого-промислового туризму. Насамперед, це припинення існування озера Гарячка в Дарниці, що перетворене у своєрідне шлакове поле внаслідок роботи ТЕС. Разом з цим, нещадної рекреаційної експлуатації зазнають практично всі сучасні об'єкти блакитно-зеленої інфраструктури міста. У червні 2026 р. відкрита рекреаційна зона «Вільнюський сквер» та великий еколого-освітній простір навколо. Він розташований між вулицею Оболонська набережна та островом Оболонським. Збудували місток Міндаугаса, зважаючи на штучне розширення гирла струмка Пробивиця, що є палеоруслом притоки р. Почайна. Перетворили його у колекторизований потік, що прямує до затоки Дніпра. Внаслідок такого антропогенного впливу були розорені гніздування водоплавних птахів та знищені значні площі оселищ флори. Це приклад територіальної організації рекреаційної діяльності не на природоохоронних засадах, а за принципами містобудівної доцільності із комерційним супроводженням. На це неодноразово звертали увагу фахівці-екологи Київського еколого-культурного центру [1].

Вище зазначені фактори, починаючи із 2022 р., істотно змінили підходи щодо формування науково-практичних засад еколого-освітньої діяльності в туристсько-рекреаційних DESTINATIONAХ та зеленій інфраструктурі м. Києва. Необхідно підкреслити, що рушійною силою таких процесів є також комерційна ініціатива установ ПЗФ, комунальних підприємств «Київзеленбуд» та «Плесо». Але не з метою отримання надприбутків, а елементарної підтримки природоохоронного функціоналу. Держава також надає підтримку відповідним ініціативам в якості запровадження відповідних тематик науково-технічних (експериментальних) розробок. В царині еколого-освітньої діяльності на туристсько-рекреаційних DESTINATIONAХ став напрямок цифрової трансформації та просторового розвитку шляхом розроблення інноваційних методичних рекомендацій з використанням ГІС-технологій для управління ПЗФ-територіями (відповідно до наказу Мінекономіки від 11.07.2024 р. № 16575, у редакції наказу від 14.05.2026 р. № 5886).

Віртуальна природознавча еколого-освітня діяльність набуває поширення через впровадження систем дистанційного просвітництва. Це реалізується шля-

хом укладання тематичних геопорталів природоохоронних територій м. Києва. Успішно функціонують еколого-освітні геопортали, як автономні тематичні модулі Національного геопорталу ПЗФ України. Це цифрова карта об'єктів туризму та рекреації «Мій парк Феофанія», як мобільний застосунок; цифрова карта інфраструктурних та туристсько-рекреаційних об'єктів, розташованих на території Регіонального ландшафтного парку «Парк партизанської слави»; електронна карта ботанічного саду Національного університету біоресурсів та природокористування. Розроблюються модулі геопорталу зонування пам'яток ландшафту і історії місцевого значення «Історичний ландшафт Київських гір і долини р. Дніпро». Але доступ до відповідних інформаційних картографічних сервісів обмежений (із зрозумілих причин).

Апробація технологій діджиталізації в еколого-освітній роботі постає через QR-інформування щодо унікальних та ексклюзивних оселищ флори та фауни. Були проведені експериментальні натурні дослідження із визначення локалізації основних цифрових аншлагів природних зон столиці. Зазначені природоохоронні зони, в яких означені QR-коди віртуальної еколого-просвітницької діяльності, організовані Департаментом захисту довкілля та адаптації до змін клімату КМДА: «Муромець» (рис. 1), РЛП «Дніпровські острови», «Наталка», Виноградівський пустир, Пуща-Водицький ліс, рекреаційна ділянка Дідоровських ставків, алея художників, рекреаційний парк «Сосновий» на ДВРЗ, зона відпочинку «Молодіжна», урочище



Рис. 1. QR-коди маркування еколого-освітнього маршруту

Передмостова Слобідка (Гідропарк), «Совки» – Скарбовий ліс, острів Долобецький, Кирилівський гай, Бабин яр тощо. Діджиталізація натурних досліджень успішно реалізовано за допомогою Android-застосунка OSMAnd (рис. 2).

Воєнний стан також впливає на якість проведення відповідного рекогносцирування туристсько-рекреаційних дестинацій м. Києва. Під час повітряної тривоги силами радіоелектронної боротьби на значний час була застосована технологія спуфінгу. Це навмисне спотворення значень географічних координат в електронних навігаційних приладах та мобільних застосунках. Як наслідок, місцезнаходження кардинально змінюється. Це також серйозна перепона у розвитку діджиталізації еколого-освітньої роботи під час воєнного стану. Особливо це матиме значення для відвідувачів великих лісових рекреаційних масивів РЛП «Дніпровські острови», НПП «Голосіївський», усього зеленого поясу м. Києва. Потенційно, це може стати наслідком небезпечного блукання рекреантів або загроза безпеці відпочинку.

Зважаючи на вище викладене, науково-практичні основи еколого-освітньої роботи у туристсько-рекреаційних дестинаціях та зеленій інфраструктурі м. Києва мають мати такі методичні та технічні етапи.

Широке впровадження діджиталізації еколого-освітніх стежок, дозволених для відвідування ПЗФ-територій м. Києва, можливе завдяки розробленню віртуальних природознавчо-екскурсійних маршрутів та QR-маркування. Звичайно, відкритий доступ до них має бути обмеженим (до скасування воєнного стану). Повнофункціональне використання можливе лише за спеціальним запитом для науково-пошукових потреб, або оперативного визначення ступеня екологічної рівноваги та деградації туристсько-рекреаційних дестинацій внаслідок активних бойових дій.

Лісові масиви зеленого поясу м. Києва вилучаються із поточних натурних визначень новітніх природно-рекреаційних об'єктів столиці. Проектування освітніх стежок та розроблення еколого-туристичних маршрутів для відповідних природних дестинацій,

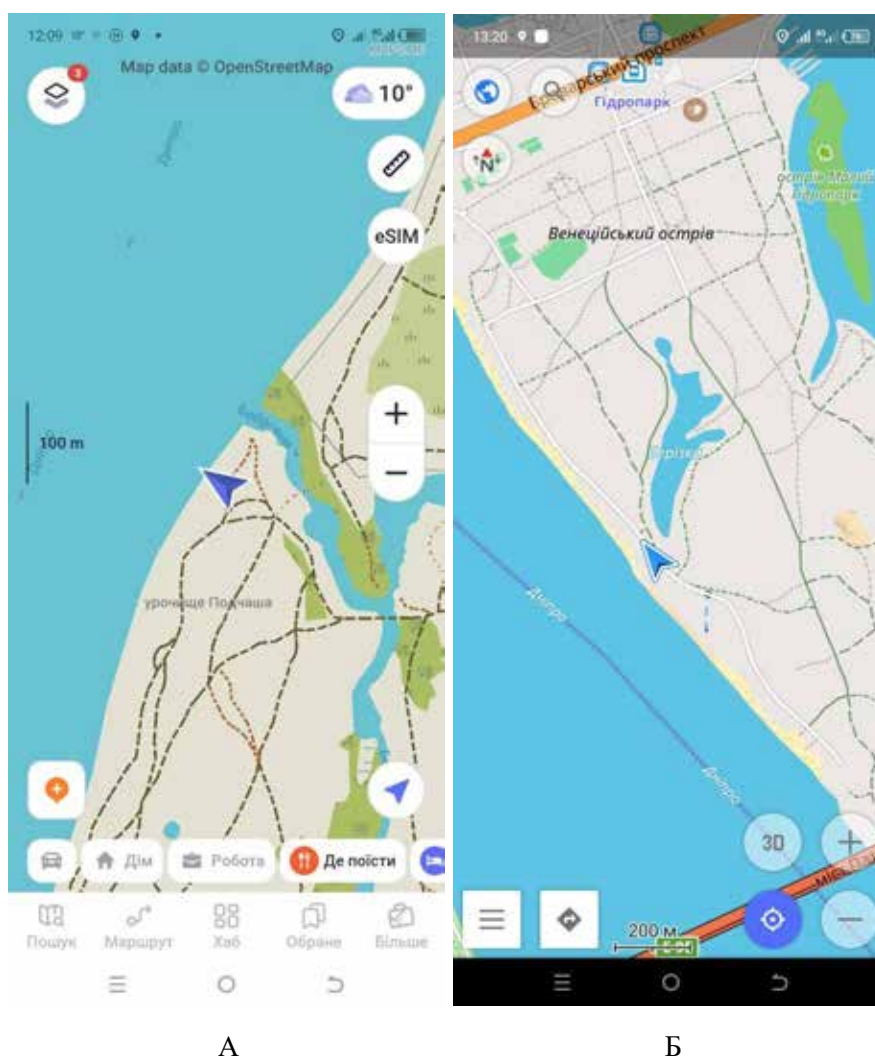


Рис. 2. Скрін роботи застосунка під час виконання натурних досліджень рекреаційних дестинацій м. Києва (РЛП «Дніпровські острови»): А – острів Муромець, Б – острів Передмостова Слобода (Венеціанський, Гідропарк)

можливе лише в середовищі геоінформаційних систем із залученням матеріалів аерокосмічної зйомки та дистанційного зондування Землі з відкритих геопорталів космофотокарт: GoogleMap, GoogleEarth, WikiMapia, OpenStreetMap тощо.

Процедура реалізації періодичних наукових природознавчих експедицій на відкритих (дозволені) зонах блакитно-зеленої інфраструктури м. Києва необхідно проводити із застосуванням таких програм Gadget-геодетики: «Geodesy» (для визначенні площ туристсько-рекреаційних destinations), був успішно застосований при дослідженні іхтіолого-ботанічного заказника «Озеро Вербне», «Maps. ME» (для цифровий онлайн-запису руху маршруту рекреантів/дослідників за локаціями destinations), «CrowdMag» (необхідно для визначення магнітних аномалій у destinations під час військового стану та у повоєнних умовах. Визначаються зони із аномальними магнітними полями, що утворюються від мін, уламків БПЛА та залишків снарядів, в тому числі таких, що не детонували. Їх ідентифікують у верхніх шарах ґрунту під підстилаючою поверхнею, яка виникає з часом).

Обов'язкове проведення фотофіксації та відеозапису руху групи рекогносцирувальників під час натурних досліджень з метою документування деградацій оселищ та екосистем у туристсько-рекреаційних destinations та блакитно-зеленої інфраструктурі м. Києва, що зазнали руйнування внаслідок обстрілів. Відповідна процедура необхідна для потреб повоєнної ревіталізації та улаштування (поновлення) відповідних об'єктів ПЗФ. Це стає фактологічним матеріалом для підготовки відомчого звіту про масштаби екологічної шкоди завданої довкіллю м. Києва для подальшої правової оцінки.

Висновки. Еколого-освітня діяльність у сучасних природних destinations рекреаційного типу пов'язана із потенційною небезпекою перебування на відкритій території під час повітряної тривоги. Виникає ризик потрапляння залишків летальних

боєприпасів, зброї, радіоактивного, хімічного та механічного забруднення рекреаційних територій, наявності мінних полів тощо. Як наслідок, за таких обставин еколого-освітня діяльність здійснюється в умовах віртуального цифрового простору. Його комп'ютерне конструювання потребує натурних польових досліджень із фото та відеодокументуванням та визначенням GPS-координат потенційних рекреаційних destinations.

Під час опрацювання матеріалів польових досліджень формується опис територій (destinations) та наявних на них екологічних загроз, проводиться експертна оцінка впливу на довкілля та алгоритми спеціального поводження із «відходами війни», окреслюються засади процедур гуманітарного розмінування для окремих міських та приміських територій.

Запровадження інформаційно-просвітницьких QR-кодів у публічних природних просторах м. Києва переводить традиційну еколого-освітню роботу у цифровий віртуальний простір із поширення екологічних знань про природоохоронні території міста, їх екологічний стан та потенціал туристсько-рекреаційного використання під час повоєнної відбудови.

Перспективи використання результатів дослідження. Науково-практичні засади реалізації польового рекогносцирування природоохоронних destinations із визначення ступеня їх туристсько-рекреаційної цінності для потреб еколого-просвітницької роботи можуть застосовуватися на ПЗФ-територіях інших населених пунктів, підконтрольних територій України.

Подальші польові дослідження із документування ступенів екологічної деградації туристсько-рекреаційних destinations м. Києва сформують геопросторову базу даних та банк екологічних знань для фінального етапу даного напрямку наукових досліджень – розроблення методичних рекомендацій щодо геоінформаційного картографування наслідків війни на території м. Києва.

Література

1. Знищення природи заповідного Оболонського острова. URL: <https://ecoethics.com.ua/znishhennya-prirodi-zapovidnogo-obolonskogo-ostrova-pidtvverzhuje-skotinne-stavlennya-vladi-kiyeva-do-zapovidnih-zon/> (дата звернення: 26.06.2026).
2. Положення про екологічну освітньо-виховну роботу установ природно-заповідного фонду. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1414-15#Text> (дата звернення: 26.06.2026).
3. Тарасова В. В., Нестерчук І. К., Ковалевська І. М., Осіпчук А. С. Географія туризму: Екологічний туризм: підручник. Житомир, 2021. 252 с. URL: <https://eprints.zu.edu.ua/34001/1/geografiya.pdf>
4. Чи достатньо у Києві зелених зон – дослідження. URL: <https://budpalata.com.ua/informations/chi-dostatno-u-kiievi-zelenih-zon-doslidzhennja/> (дата звернення: 26.06.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 26.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

МОНІТОРИНГ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ

УДК 630*5:502.3:004

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.33>

СУЧАСНІ МЕТОДИ МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМ УКРАЇНИ: СТАН, ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Бондарчук Ю.В., Мельник-Шамрай В.В.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

bondarchuk533@gmail.com, org_vvm@ztu.edu.ua

У статті здійснено комплексний аналіз сучасного стану системи моніторингу лісових екосистем України в умовах посилення антропогенного навантаження, зміни клімату та негативного впливу воєнних дій. Обґрунтовано необхідність удосконалення існуючих підходів до моніторингу лісів як важливої складової інформаційного забезпечення сталого управління лісовими ресурсами та своєчасного виявлення негативних змін у лісових екосистемах. Проаналізовано сучасний стан функціонування національної системи моніторингу лісів, особливості її організації відповідно до міжнародної програми ICP Forests, а також визначено ключові організаційні, інституційні, фінансові, технічні, методичні, кадрові та інформаційні проблеми, що обмежують ефективність її функціонування. Систематизовано сучасні методи моніторингу лісових екосистем та проведено їх порівняльну характеристику з урахуванням функціональних можливостей, переваг і обмежень практичного застосування. Розглянуто можливості використання технологій дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, лазерного сканування (LiDAR), сенсорних мереж, автоматизованих систем збору даних і методів штучного інтелекту для підвищення оперативності, достовірності та просторової деталізації оцінювання стану лісових насаджень. Особливу увагу приділено інтеграції різномірних джерел даних у єдину інформаційно-аналітичну систему, що забезпечує комплексне оцінювання стану лісових екосистем, своєчасне виявлення негативних процесів та науково обґрунтовану підтримку прийняття управлінських рішень. Встановлено, що подальший розвиток системи моніторингу лісових екосистем України має ґрунтуватися на комплексному впровадженні сучасних цифрових технологій, гармонізації національної системи з міжнародними стандартами, розвитку національної інвентаризації лісів і формуванні єдиного інформаційного простору моніторингових даних. Реалізація запропонованих підходів сприятиме підвищенню ефективності управління лісовими ресурсами, забезпеченню екологічної безпеки, збереженню біорізноманіття та реалізації принципів сталого розвитку лісового господарства України. *Ключові слова:* лісові екосистеми, моніторинг лісів, національна інвентаризація лісів, цифрові технології, стале управління лісами.

Modern methods of monitoring forest ecosystems in Ukraine: current state, challenges and development prospects.
Bondarchuk Yu., Melnyk-Shamrai V.

The article presents a comprehensive analysis of the current state of the forest ecosystem monitoring system in Ukraine under conditions of increasing anthropogenic pressure, climate change, and the adverse impacts of military activities. The necessity of improving existing approaches to forest monitoring is substantiated as an essential component of the information support system for sustainable forest resource management and the timely detection of negative changes in forest ecosystems. The current state of the national forest monitoring system is analysed, including the specific features of its organisation in accordance with the international ICP Forests programme. The study also identifies the key organisational, institutional, financial, technical, methodological, human resource, and information-related challenges that constrain the effective functioning of the monitoring system. Modern methods of forest ecosystem monitoring are systematised, and their comparative analysis is carried out with regard to their functional capabilities, advantages, and limitations in practical application. The potential of remote sensing technologies, geographic information systems (GIS), LiDAR, sensor networks, automated data acquisition systems, and artificial intelligence methods for improving the efficiency, reliability, and spatial resolution of forest condition assessment is examined. Particular attention is paid to the integration of heterogeneous data sources into a unified information and analytical system, enabling comprehensive assessment of forest ecosystem conditions, timely detection of adverse processes, and scientifically grounded support for forest management decision-making. The study demonstrates that the further development of the forest ecosystem monitoring system in Ukraine should be based on the integrated implementation of modern digital technologies, harmonisation of the national monitoring system with international standards, further development of the National Forest Inventory, and the establishment of a unified information environment for forest monitoring data. The implementation of the proposed approaches will contribute to more effective forest resource management, enhanced environmental safety, biodiversity conservation, and the implementation of the principles of sustainable forest management in Ukraine. *Key words:* forest ecosystems; forest monitoring; National Forest Inventory; digital technologies; sustainable forest management.



© Бондарчук Ю.В., Мельник-Шамрай В.В., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Лісове господарство України в сучасних умовах стикається з комплексом викликів, подолання яких неможливе в межах традиційних підходів до ведення галузі. До них належать наслідки зміни клімату, військові дії та їх вплив на лісові території, необхідність посилення контролю за незаконними вирубками, зростання частоти та масштабів лісових пожеж, а також збереження біорізноманіття. Водночас лісове господарство залишається однією з ключових галузей економіки України, забезпечуючи значні обсяги надходжень до бюджету, що обчислюються десятками мільярдів гривень щорічно [1]. Саме тому виникає необхідність підвищення ефективності управління лісовими ресурсами та, відповідно, покращення якості інформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень.

За таких умов існуюча система моніторингу лісів виявляється недостатньо результативною, оскільки не забезпечує отримання своєчасних, повних і достовірних даних про стан лісових екосистем. Як наслідок, обмежується можливість оперативного реагування на негативні зміни та формування обґрунтованих управлінських рішень. У зв'язку з цим виникає об'єктивна необхідність перегляду існуючих підходів до моніторингу та переходу до використання новітніх методів і технологій, здатних забезпечити підвищення точності, оперативності та комплексності оцінювання стану лісів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ліси України є критично важливим природним ресурсом, що виконує ключові екологічні, економічні та соціальні функції. Вони відіграють фундаментальну роль у регулюванні водного балансу, захисті ґрунтів від ерозії, підтримці біорізноманіття та секвестрації вуглекислого газу, що безпосередньо впливає на пом'якшення наслідків глобальних змін клімату [2].

Загальна площа лісового фонду України становить 10,4 млн га, з яких лісовою рослинністю вкрито 9,6 млн га, що відповідає рівню лісистості близько 15,9 %. Більшість лісів перебуває у державній власності, проте значна частка (близько 13 %) належить до комунальної власності [3]. Лісові екосистеми надають широкий спектр екосистемних послуг: регулюючі (клімат, очищення повітря), постачальні (деревина), культурні (рекреація) та підтримуючі [4]. Незважаючи на високу екологічну цінність, стан лісів в Україні в останні десятиліття значно погіршився під впливом комплексу природних та антропогенних чинників.

Однією з найбільш гострих проблем є прогресуюче засихання лісових насаджень, насамперед хвойних [5]. Таке явище безпосередньо пов'язане зі зміною кліматичних умов, зокрема підвищенням середньорічних температур, збільшенням тривалості посушливих періодів та зниженням рівня ґрунтових вод. У сукупності ці фактори призводять до ослаблення деревостанів, зниження їх стійкості до

зовнішніх впливів та підвищення вразливості до біотичних чинників.

Кліматичні зміни створюють сприятливі умови для масового розмноження шкідників і поширення хвороб лісу. Зокрема, значної шкоди завдає верхівковий короїд, який уражає ослаблені соснові насадження та спричиняє їх масове відмирання. Поширення таких шкідників має характер епіфітотії і є одним із ключових факторів деградації лісових екосистем [6-8].

Суттєвий негативний вплив на стан лісових екосистем чинять антропогенні фактори, інтенсивність яких останніми десятиліттями невпинно зростає. Однією з найбільш серйозних загроз залишається незаконна вирубка лісів, яка призводить до скорочення площ лісових насаджень, порушення вікової та породної структури деревостанів, деградації природних біотопів і втрати цінних оселищ для багатьох видів флори та фауни [9, 10]. Несанкціоноване вилучення деревини часто супроводжується пошкодженням ґрунтового покриву, ущільненням ґрунтів та порушенням природних процесів лісовідновлення, що ускладнює відновлення екосистем після господарського втручання. В Україні проблема незаконних рубок залишається актуальною, а за даними громадських екологічних організацій у 2024 році зафіксовано зростання обсягів незаконно заготовленої деревини більш ніж на 30 % порівняно з попереднім роком [11]. Вирубка та деградація лісів розглядаються міжнародними організаціями як одні з основних причин втрати біорізноманіття та посилення змін клімату. За оцінками ФАО, у світі протягом 1990–2020 років було втрачено близько 420 млн га лісів, що суттєво вплинуло на стан природних екосистем та їхню здатність підтримувати біологічне різноманіття [19].

Значну небезпеку для лісових екосистем становить також забруднення довкілля промисловими відходами та викидами підприємств. Потрапляння у природне середовище важких металів, нафтопродуктів, кислотних сполук та інших токсичних речовин призводить до погіршення фізико-хімічних властивостей ґрунтів, пригнічення росту деревної рослинності, зниження стійкості лісів до хвороб і шкідників [12–14].

Лісові пожежі є одним із найбільш небезпечних чинників деградації лісових екосистем, оскільки спричиняють знищення рослинного покриву, загибель тварин, зменшення біорізноманіття, погіршення властивостей ґрунтів та порушення процесів природного відновлення лісів. Крім того, пожежі призводять до значних викидів вуглецю в атмосферу та зниження здатності лісів виконувати кліматорегулюючу функцію [15–18].

Для України проблема збереження лісових ресурсів набуває особливої актуальності, оскільки поряд із традиційними антропогенними чинниками, такими як незаконні рубки, забруднення довкілля та фрагментація лісових масивів, значний негативний

вплив на лісові екосистеми чинять наслідки воєнних дій [20–24]. Збройна агресія супроводжується масштабними лісовими пожежами, руйнуванням природних оселищ, забрудненням і мінуванням територій, що порушує природні процеси відновлення лісів та призводить до втрати біорізноманіття. Сукупна дія природних і антропогенних факторів спричиняє погіршення санітарного стану насаджень, зниження екологічної стійкості лісових екосистем та їх здатності виконувати важливі природоохоронні функції. У зв'язку з цим особливого значення набуває вдосконалення системи моніторингу лісів та впровадження сучасних методів оцінювання їхнього стану, що забезпечить своєчасне виявлення негативних змін і підвищення ефективності природоохоронних заходів.

Питання моніторингу стану лісових екосистем є одним із пріоритетних напрямів сучасних екологічних досліджень, що пов'язано зі зростанням антропогенного навантаження, зміною клімату та необхідністю забезпечення сталого управління лісовими ресурсами. Аналіз наукових праць свідчить, що традиційні методи оцінювання стану лісів, засновані переважно на польових спостереженнях, залишаються важливою складовою моніторингу, проте дедалі частіше доповнюються сучасними цифровими технологіями та методами математичного моделювання [25, 26].

Окремий напрям досліджень присвячений аналізу репрезентативності мережі моніторингових ділянок та оцінці достовірності отриманих результатів. Зокрема, встановлено, що ефективність моніторингу значною мірою залежить від просторової структури мережі спостережень та її відповідності міжнародним стандартам [27]. Водночас низка авторів відзначає, що існуючі системи моніторингу часто характеризуються недостатньою щільністю пунктів спостереження, обмеженим фінансуванням та значними часовими витратами на збір польових даних, що знижує оперативність реагування на негативні зміни у лісових екосистемах [26].

Суттєва увага в сучасних дослідженнях приділяється використанню технологій дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем. Доведено, що супутникові дані програм Landsat, Sentinel та MODIS забезпечують можливість оперативного виявлення змін лісового покриву, оцінювання наслідків пожеж, незаконних рубок, поширення шкідників і впливу кліматичних чинників на стан лісів. У роботі [28] продемонстровано ефективність супутникового моніторингу для оцінювання глобальних змін лісового покриву, тоді як автори [29] обґрунтували доцільність інтеграції даних дистанційного зондування з результатами наземних спостережень. В умовах України особливої актуальності такі підходи набули після початку повномасштабних воєнних дій, коли доступ до значної частини лісових територій став обмеженим або неможливим.

Попри значну кількість досліджень, питання інтеграції польових спостережень, геоінформаційних технологій, дистанційного зондування та математичного моделювання в єдину систему оцінювання стану лісових екосистем залишається недостатньо опрацьованим. Більшість існуючих робіт зосереджена на окремих методах моніторингу, тоді як комплексне використання різномірних джерел даних для прогнозування стану лісів та підтримки управлінських рішень потребує подальшого розвитку. Саме тому актуальним є дослідження можливостей використання сучасних методів моніторингу та моделювання для комплексної оцінки стану лісових екосистем, підвищення точності виявлення негативних змін та забезпечення науково обґрунтованого управління лісовими ресурсами в умовах сучасних екологічних викликів.

Мета статті полягає в аналізі сучасного стану системи моніторингу лісових екосистем, виявленні основних проблем її функціонування та обґрунтуванні перспектив розвитку сучасних методів моніторингу для підвищення ефективності оцінювання стану лісових екосистем в умовах сучасних екологічних викликів. Об'єкт дослідження – процес моніторингу стану лісових екосистем. Предмет дослідження – сучасні методи моніторингу лісових екосистем, особливості їх застосування, проблеми впровадження та перспективи розвитку в Україні.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у систематизації сучасних методів моніторингу лісових екосистем, узагальненні основних проблем функціонування системи моніторингу лісів України та обґрунтуванні перспективних напрямів її розвитку на основі комплексного використання технологій дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, лазерного сканування, сенсорних технологій та штучного інтелекту для підвищення точності, оперативності й інформаційної цінності оцінювання стану лісових екосистем. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані підходи можуть бути використані органами державного управління, лісгосподарськими підприємствами, науковими установами та природоохоронними організаціями для вдосконалення системи моніторингу лісів, підвищення дієвості прийняття управлінських рішень, своєчасного виявлення негативних змін у лісових екосистемах та планування заходів щодо їх збереження і відновлення.

Методика дослідження. У процесі дослідження використано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів. Застосовано методи аналізу, синтезу, порівняння та узагальнення наукових джерел для дослідження сучасного стану моніторингу лісів в Україні та світі. Для оцінювання структури та особливостей функціонування системи моніторингу лісів використано системний підхід. Метод порівняльного аналізу застосовано для дослідження традиційних і сучасних технологій моніторингу

лісових екосистем. Для обґрунтування перспектив використання цифрових технологій використано методи структурно-логічного аналізу, систематизації та моделювання, а також опрацьовано результати національних та міжнародних програм моніторингу лісів.

Виклад основного матеріалу. Згідно з Лісовим кодексом України [30], моніторинг лісів – це система регулярного спостереження, оцінки і прогнозу динаміки кількісного і якісного стану лісів, що проводиться шляхом збирання, передавання, збереження та аналізу інформації про стан лісів, прогнозування змін та розробки науково обґрунтованих рекомендацій для інформаційно-аналітичного забезпечення управління лісами, прийняття рішень щодо запобігання негативним змінам стану лісів, дотримання вимог екологічної безпеки та принципів ведення лісового господарства на засадах сталого розвитку.

Завдяки існуванню міжнародної програми ICP Forests (International Cooperative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests), що функціонує в рамках United Nations Economic Commission for Europe та спрямована на довгостроковий моніторинг стану лісів і оцінку впливу забруднення повітря на лісові екосистеми, було сформовано уніфіковані підходи до збору та аналізу інформації про стан лісів [31]. Практична реалізація положень цієї програми передбачає створення мережі постійних пробних площ, на яких здійснюються регулярні спостереження за станом лісових насаджень, а також застосування стандартизованих показників оцінки, зокрема рівня дефоліації, дехромації та інших індикаторів життєздатності дерев.

З метою детального розуміння структури системи моніторингу лісів, сформованої відповідно до вимог програми ICP Forests, доцільно розглянути особливості її двох основних рівнів – екстенсивного (Level I) та інтенсивного (Level II) (табл. 1). Кожен

із цих рівнів має різне функціональне призначення, просторове охоплення та глибину досліджень, що визначає їх роль у формуванні інформаційної бази для управління лісовими ресурсами.

Порівняльний аналіз рівнів моніторингу свідчить про їх взаємодоповнювальний характер: екстенсивний рівень забезпечує широке територіальне охоплення та формує загальне уявлення про стан лісових ресурсів, тоді як інтенсивний рівень дозволяє виявляти причинно-наслідкові зв'язки змін у лісових екосистемах на основі детальних спостережень. Водночас дисбаланс у розвитку цих рівнів в Україні, зокрема недостатня реалізація інтенсивного моніторингу, суттєво обмежує можливості комплексного аналізу екологічних процесів. Це призводить до ситуації, коли наявні дані дозволяють фіксувати зміни, але не дають змоги повною мірою пояснити їх причини та прогнозувати подальший розвиток екосистем. Отже, для підвищення ефективності національної системи моніторингу лісів необхідним є посилення інтенсивного рівня спостережень та забезпечення його інтеграції з екстенсивним рівнем, що відповідатиме підходам, закладеним у міжнародній програмі ICP Forests.

Недостатній розвиток інтенсивного рівня моніторингу є лише одним із проявів широкого комплексу проблем, що характеризують сучасний стан системи моніторингу лісів в Україні. З огляду на це доцільною є їх систематизація та аналіз. З метою комплексного розуміння причин обмеженої реалізації функціонування системи моніторингу лісів в Україні доцільно узагальнити основні проблеми за їх змістом, походженням та наслідками (табл. 2).

Представлений аналіз свідчить про комплексний характер проблем, що охоплюють організаційні, технічні та інституційні аспекти функціонування системи моніторингу. Результати свідчать про необхідність не лише удосконалення окремих елементів системи, а й її комплексної модернізації. У цьому

Таблиця 1

Порівняльна характеристика рівнів моніторингу лісів

Критерій	Рівень I (екстенсивний)	Рівень II (інтенсивний)
Основна мета	Загальна оцінка стану лісів	Детальне вивчення екосистемних процесів
Просторове охоплення	Широке (національний рівень)	Локальне (окремі ділянки)
Щільність пробних площ	Низька	Висока
Частота спостережень	Періодична	Регулярна/безперервна
Перелік показників	Обмежений (основні індикатори)	Розширений (фізіологічні, хімічні, кліматичні)
Рівень деталізації даних	Середній	Високий
Основне призначення	Моніторинг загальних тенденцій	Аналіз причин і процесів змін
Роль у системі	Базовий рівень оцінки	Поглиблений аналітичний рівень
Стан реалізації в Україні	Реалізується відносно стабільно	Має обмежений, фрагментарний характер

Джерело: систематизовано авторами на основі літературних джерел

Таблиця 2

Основні проблеми системи моніторингу лісів в Україні

Група проблем	Конкретні прояви	Причини виникнення	Наслідки для системи моніторингу
Організаційні	децентралізація, передача функцій підприємствам	відсутність єдиної координації	неузгодженість методик та даних
Інституційні	відсутність стабільної звітності, порушення міжнародних вимог	слабке державне управління	зниження довіри міжнародних партнерів
Фінансові	припинення або нестача фінансування	завершення державних програм	скорочення обсягів моніторингу
Технічні	використання застарілих методів	повільне впровадження інновацій	низька точність та оперативність даних
Методичні	обмежений перелік показників, слабкий розвиток Level II	неповна імплементація ICP Forests	відсутність глибокого аналізу
Кадрові	різний рівень підготовки фахівців	децентралізація, нестача навчання	нерівномірна якість даних
Воєнні	окупація територій, мінування, пожежі	військові дії	неможливість збору польових даних
Інформаційні	відсутність єдиної бази даних	слабка цифровізація	фрагментарність інформації

Джерело: систематизовано авторами на основі літературних джерел

контексті особливої актуальності набуває впровадження сучасних методів та технологій моніторингу, які здатні підвищити точність, оперативність і повноту отримання інформації про стан лісових екосистем.

Так, прийняття Закону України «Про внесення змін до Лісового кодексу України щодо національної інвентаризації лісів» (2020 р.) [32] та затвердження Порядку проведення національної інвентаризації лісів (2021 р.) [33] заклали нормативно-правову основу для відновлення системних спостережень. У межах реалізації цих документів визначено відповідальні установи, зокрема ВО «Укрдержліспроєкт» [34] та УкрНДЛГА [35], розпочато польові роботи, а також впроваджено сучасні підходи до збору даних, включаючи дистанційне зондування Землі.

Додатково, наприкінці 2025 року розпочато процес відновлення участі України в міжнародній програмі ICP Forests, що свідчить про повернення до інтеграції у міжнародну систему моніторингу лісів. Таким чином, попри наявні проблеми, формуються передумови для модернізації системи моніторингу лісів, що актуалізує необхідність впровадження сучасних методів збору та обробки інформації.

Для окреслення потенційних шляхів застосування новітніх методів моніторингу та моделювання стану лісових екосистем необхідно насамперед визначити основні засоби моніторингу, що використовуються в Україні на сучасному етапі. Першочерговим методом моніторингу є національна інвентаризація лісів (НІЛ) [36] – система вибірково-статистичних обстежень лісового фонду, спрямована на отримання обґрунтованої узагальненої інформації щодо кількісних та якісних характеристик лісів для потреб стра-

тегічного планування, ведення лісового господарства, державного лісового кадастру та моніторингу. НІЛ є визнаним інструментом оцінювання лісових ресурсів, який широко застосовується у більшості європейських країн.

Відповідно до Концепції розбудови національної інвентаризації та моніторингу лісів України [37], сформовано багаторівневу систему оцінки стану лісів, що базується на вибірково-статистичних методах та інтеграції різних джерел даних. Водночас повноцінному впровадженню НІЛ в Україні перешкоджає низка факторів, серед яких ключову роль відіграють наслідки військових дій. Значні території є тимчасово окупованими або забрудненими вибухонебезпечними предметами, що унеможливило проведення польових досліджень традиційними методами [22–24]. Це суттєво обмежує повноту отриманих даних і впливає на якість оцінювання стану лісових ресурсів.

Окрім цього, система моніторингу лісів в Україні стикається з низкою організаційних та інституційних проблем та інституційних проблем, серед яких відсутність єдиної стратегії сталого управління, корупційні ризики, недостатній рівень залучення громадськості, а також наслідки децентралізації, що призвели до передачі частини функцій безпосередньо лісгосподарським підприємствам. Як наслідок, виникають проблеми з уніфікацією методик, якістю даних та можливістю проведення комплексного аналізу.

З огляду на складність і багатокомпонентність процесу інвентаризації лісів, доцільно систематизувати його основні етапи, що дозволяє більш чітко зрозуміти організацію збору та обробки даних (табл. 3).

Таблиця 3

Основні етапи національної інвентаризації лісів

Етап	Зміст робіт	Інструменти
Підготовчий	планування, стратифікація, формування мережі ділянок, підготовка даних ДЗЗ	ГІС, супутникові дані
Польовий	пошук ділянок, вимірювання дерев, опис рослинності, фотофіксація	GPS, геодезичні прилади
Камеральний	обробка даних, статистичний аналіз, формування звітності	бази даних, аналітичні системи

Джерело: систематизовано авторами на основі літературних джерел

Представлена структура інвентаризації лісів дозволяє розглядати її як цілісний багатоступеневий процес, що включає підготовчий, польовий та камеральний етапи, кожен з яких має власні функції та інструменти реалізації. Такий підхід дає можливість не лише систематизувати процес збору та обробки даних, але й виявити ключові обмеження на кожному з етапів. Зокрема, найбільш вразливим є польовий етап, ефективність якого суттєво знижується в умовах обмеженого доступу до територій, тоді як камеральний етап потребує сучасних інструментів обробки великих масивів даних. Результати вивчення питання підкреслюють необхідність інтеграції новітніх технологій на всіх рівнях інвентаризації, що створює передумови для переходу до більш удосконаленої та автоматизованої системи моніторингу.

В умовах зростаючих викликів, таких як зміна клімату, антропогенний вплив та наслідки війни, традиційні методи моніторингу виявляються недостатніми. Це обумовлює необхідність впровадження

сучасних технологій, що дозволяють підвищити ефективність збору та обробки даних (табл. 4).

Використання сучасних технологій моніторингу дозволяє суттєво розширити можливості аналізу стану лісових екосистем, забезпечуючи як широке просторове охоплення, так і високу деталізацію даних. Водночас жодна з наведених технологій не є самодостатньою, а їх ефективність досягається лише за умови комплексного використання, яке дозволяє інтегрувати різноманітні дані та підвищити обґрунтованість управлінських рішень.

Окремої уваги заслуговує використання штучного інтелекту, який відкриває принципово нові можливості для аналізу великих масивів даних, моделювання складних екосистемних процесів та підтримки прийняття управлінських рішень у сфері лісового господарства. На відміну від традиційних підходів, заснованих на обмежених вибірках та ручній обробці інформації, сучасні алгоритми дозволяють виявляти приховані закономірності, оцінювати динаміку змін та формувати прогнози розвитку лісо-

Таблиця 4

Сучасні технології моніторингу лісів

Технологія	Основні функції	Переваги	Обмеження
Дистанційне зондування Землі	отримання супутникових та аерофотознімків територій	велике просторове охоплення, можливість моніторингу важкодоступних територій	залежність від погодних умов, потреба в обробці великих масивів даних
Лазерне сканування (LiDAR)	побудова тривимірних моделей лісових насаджень, оцінка структури деревостанів	висока точність, можливість детального аналізу	висока вартість, складність обробки
Геоінформаційні системи	інтеграція, аналіз та візуалізація просторових даних	комплексний аналіз інформації, підтримка прийняття рішень	потреба у якісних вхідних даних та спеціалізованому програмному забезпеченні
Технології Інтернету речей	безперервний збір даних з датчиків та сенсорів у реальному часі	оперативність отримання інформації, автоматизація процесів	потреба в інфраструктурі та енергозабезпеченні
Системи диспетчерського управління та збору даних	централізований моніторинг та управління процесами	інтеграція різних джерел даних, контроль у реальному часі	складність впровадження та обслуговування
Штучний інтелект	аналіз великих масивів даних, виявлення закономірностей та прогнозування	автоматизація аналітики, підвищення точності прогнозів	залежність від якості даних, потреба у навчанні моделей

Джерело: систематизовано авторами на основі літературних джерел

Таблиця 5

Напрями використання штучного інтелекту для моніторингу лісів

Напрямок	Конкретні задачі	Інструменти/методи	Практичний результат
Моніторинг стану лісів	виявлення змін у деревостанах, пошкоджень, дефоліації, захворювань	комп'ютерний зір, аналіз супутникових знімків	своєчасне виявлення негативних процесів
Виявлення загроз	ідентифікація пожеж, незаконних вирубок, деградації	аналіз зображень, алгоритми розпізнавання	оперативне реагування на ризики
Прогнозування змін	моделювання розвитку екосистем, оцінка впливу кліматичних факторів	машинне навчання, прогностичні моделі	підвищення точності планування
Оцінка ресурсів	визначення запасів деревини, біомаси, вуглецю	аналіз даних ДЗЗ, нейромережі	обґрунтоване управління ресурсами
Управління та планування	оптимізація заходів лісокористування та відновлення	системи підтримки прийняття рішень	підвищення ефективності управління
Аналіз великих даних	інтеграція даних з різних джерел (ДЗЗ, сенсори, НІЛ)	Big Data, аналітичні платформи	комплексне бачення стану лісів

Джерело: створено авторами на основі літературних джерел

вих екосистем з урахуванням множинних факторів впливу. З огляду на це доцільно систематизувати основні напрями застосування штучного інтелекту в контексті моніторингу лісів (табл. 5).

Узагальнення напрямів використання штучного інтелекту для моніторингу лісів свідчить про його ключову роль у трансформації підходів до збору, обробки та аналізу інформації про стан лісових екосистем. На відміну від традиційних методів, які здебільшого забезпечують фіксацію окремих показників у визначені моменти часу, застосування технологій штучного інтелекту дозволяє здійснювати безперервний аналіз даних, виявляти приховані закономірності та формувати обґрунтовані прогнози розвитку екосистем. Важливою перевагою є можливість інтеграції різномірних джерел інформації – результатів національної інвентаризації лісів, даних дистанційного зондування Землі, сенсорних систем та інших цифрових платформ – у єдину аналітичну систему. Такий підхід забезпечує комплексне бачення стану лісів і дозволяє підвищити якість управлінських рішень у сфері лісового господарства.

Водночас ефективність впровадження штучного інтелекту безпосередньо залежить від рівня цифровізації галузі, доступності якісних вихідних даних та наявності відповідної інфраструктури. Таким чином, його застосування слід розглядати не як окремий інструмент, а як складову інтегрованої, технологічно забезпеченої системи моніторингу, здатної адаптуватися до сучасних викликів та забезпечувати сталий розвиток лісових екосистем.

Висновки. Проведений аналіз засвідчив, що сучасна система моніторингу лісових екосистем України функціонує в умовах комплексного впливу природних, антропогенних та воєнних чинників, які

істотно ускладнюють отримання своєчасної, повної та достовірної інформації про стан лісових ресурсів. Встановлено, що поряд із поступовим відновленням національної системи моніторингу та інтеграцією до міжнародних програм зберігається низка організаційних, інституційних, технічних, методичних і фінансових проблем, які стримують ефективне функціонування системи.

У результаті дослідження систематизовано основні проблеми функціонування моніторингу лісів України, узагальнено сучасні технології оцінювання стану лісових екосистем та визначено їхні переваги й обмеження. Показано, що найбільш перспективним напрямом розвитку є інтеграція даних національної інвентаризації лісів, дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, лазерного сканування, сенсорних технологій та методів штучного інтелекту в єдину інформаційно-аналітичну систему. Такий підхід забезпечує підвищення оперативності моніторингу, точності оцінювання стану лісових екосистем, можливість раннього виявлення негативних змін, прогнозування розвитку екологічних процесів і науково обґрунтованої підтримки управлінських рішень. Отримані результати свідчать, що подальша модернізація системи моніторингу лісів має здійснюватися на засадах комплексного використання сучасних цифрових технологій, гармонізації національних підходів із міжнародними стандартами та розвитку єдиної інформаційної інфраструктури. Реалізація зазначених напрямів сприятиме підвищенню ефективності управління лісовими ресурсами, зміцненню екологічної безпеки та забезпеченню сталого функціонування лісових екосистем України в умовах сучасних екологічних викликів.

Література

1. Лісова галузь у 2024 році досягла рекордного чистого доходу в 23,7 млрд грн. URL: <https://surl.li/bgcchf> (дата звернення 07.04.2026).
2. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Краснов В.П., Можарівська І.А., Іванюк Р.О., Весельський О.О. Екологічна безпека лісових екосистем в умовах невизначеності. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2025. № 3(60). С. 124-132. DOI: doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.3-60.23
3. Загальна характеристика лісів України. URL: <https://surl.li/xlqeuw> (дата звернення 07.04.2026).
4. Іванюк Р.О., Скоковський М.В., Дмитренко С.А., Мельник-Шамрай В.В. Екосистемні послуги лісових екосистем. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», 14 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 38.
5. Кабаль М., Сухарюк Д., Зейкан М. Формування змішаних різновікових лісів як засіб адаптації до кліматичних змін. Сталій розвиток – стан та перспективи: Матеріали II Міжнародного наукового симпозиуму SDEV'2020 (12-15 лютого 2020 року, Львів-Славське, Україна). Львів, 2020. С. 73–75.
6. Жуковський О.В., Орлов О.О., Зборовська О.В., Струтинський О.В., Шевчук В.В., Карчевський Р.А., Гулик І.Т., Левківський О.В. Санітарний стан соснових деревостанів після проведення санітарних рубок вибіркового, у кулісах та дрібноконтурних ділянках в осередках ураження короїдом верхівковим. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2018, т. 28, № 8. С. 87-91. <https://doi.org/10.15421/40280818>
7. Жуковський О.В., Краснов В.П., Іванюк І.Д., Курбет Т.В., Зборовська О.В. Поширення короїда верхівкового (*Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827) і трахеомікозу хвойних порід стовбуром сосни звичайної. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2022. Вип. 32 (4). С. 38-43. <https://doi.org/10.36930/40320406>
8. Іванюк Р.О., Мельник-Шамрай В.В. Роль шкідників і хвороб у трансформації екосистемних послуг лісових екосистем. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки м. Житомир, 11–15 травня 2026 р. Житомир: «Житомирська політехніка», 2026. С. 395-397.
9. Лакида П.І., Ситник С.А., Ловинська В.М., Голобородько К.К. Аналіз матеріалів кримінальних впроваджень щодо незаконних рубок в лісах України. *Вісник Сумського аграрного університету. Сер. «Агрономія та біологія»*. 2024. 58(4). С. 64–70. Режим доступу : <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/12988>
10. Дебера Н., Гринчишин Н. Економічний ефект заходів державного контролю з виявлення незаконної рубки дерев. Проблеми та перспективи розвитку системи безпеки життєдіяльності: 36. наук. праць Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, курсантів та студентів. Львів: ЛДУ БЖД, 2024. С. 758-761.
11. Звіт про обсяги офіційно задокументованих незаконних рубок у лісах України у 2024 році. URL: <https://surl.li/wychpl>
12. Shparyk Y.S., Parpan V.I. Heavy metal pollution and forest health in the Ukrainian Carpathians. *Environmental Pollution*. 2004. Vol.130. Is. 1. P. 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.030>
13. Łukaszek-Chmielewska, A., Rakowska, J., Rachwał, M. et al. Assessment of forest soil contamination by heavy metals in the Polish National Park near Warsaw. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. P. 4099. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88754-2>
14. Sidor C.G., Vlad R., Popa I., Semeniuc A., Apostol E., Badea O. Impact of Industrial Pollution on Radial Growth of Conifers in a Former Mining Area in the Eastern Carpathians (Northern Romania). *Forests*. 2021. Vol. 12(5) P. 640. <https://doi.org/10.3390/f12050640>
15. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Екологічні наслідки лісових пожеж та удосконалення системи протипожежних заходів у лісових екосистемах Житомирської області. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. 2026. № 65. С. 39-47. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.2-65.6>
16. Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Пацева І.Г., Пацев І.С. Лісові пожежі у фокусі кластерного аналізу: екосистемні та технологічні аспекти через призму VOSviewer. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 270-279. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.11.2025.29>
17. Герасимчук Д.О., Герасимчук Л.О., Валерко Р.А., Пацев І.С., Кириленко Н.П. Екологічні ризики лісових пожеж в Україні з урахуванням кліматичних, антропогенних та воєнних детермінантів. *Екологічні науки*. 2025. № 6(63). С. 216-220. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.34>
18. Іванюк Р.О., Мельник-Шамрай В.В. Лісові пожежі в Україні. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», 14 листопада 2024 року. Житомир : Житомирська політехніка, 2024. С. 17.
19. В ЄС ухвалили закон для боротьби з глобальною вирубкою та деградацією лісів. URL: <https://surl.li/eettgy> (дата звернення: 01.06.2026 р.).
20. Калашніков А.О., Жежжун І.М., Топосов А.С. Loss of wood resources and biodiversity in Ukrainian forests. *Forestry and Forest Melioration*. 2024. Vol. (145). P. 143–154. <https://doi.org/10.33220/1026-3365.145.2024.143>
21. Демчук Л.І., Пацев І.С., Скиба Г.В., Войналович І.М. Оцінка відновлення лісових екосистем після війни: ризики та надії. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. Серія: Технологія захисту навколишнього середовища*. 2025. Вип. 1. С. 191-198. DOI [https://doi.org/10.15589/znz2025.1\(499\).27](https://doi.org/10.15589/znz2025.1(499).27)
22. Пацева І.Г., Аппагова О.М., Демчук Л.І., Кірейцева Г.В., Левицький В.Г. Сучасний стан навколишнього природного середовища в умовах впливу війни. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2022. Вип. 4 (43). С. 19-22. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.4-43.3>
23. Пацев І.С., Барабаш О.В., Пацева І.Г. Вплив воєнних дій на лісові екосистеми Житомирщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 5 (50). С. 114–118. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.16>
24. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Голдаммер Й.Г., Миронюк В.В., Борсук О.А., Гуменюк В.В., Мешкова В.Л., Василюк О.В., Букша І.Ф. Лісоуправління на територіях, забруднених вибухонебезпечними предметами. WWF-Україна, 2022. 148 с.

25. Панкова С.О., Бондар А.О., Матусяк М.В., Піддубна А.М. Методологічні та методичні засади моніторингу лісів України. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 13. С. 395-401. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.13.2025.37>
26. Пузріна Н.В., Мешкова В.Л., МIRONЮК В.В., Бондар А.О., Токарева О.В., Бойко Г.О. Моніторинг лісових екосистем : навч. посіб. Київ: НУБіП України, 2021. 273 с.
27. Букша І.Ф., Букша М.І., Пивовар Т.С. Оцінка репрезентативності даних моніторингу лісів України зарізної щільності мережі ділянок спостережень. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2019. Вип. 134. С. 66-67. 10.33220/1026-3365.134.2019.66
28. Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 2013. Vol. 342, No. 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
29. Wulder M.A., Loveland T.R., Roy D.P., Crawford C.J., Masek J.G., Woodcock C.E. et al. Current Status of Landsat Program, Science, and Applications. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 225. P. 127–147. DOI: 10.1016/j.rse.2019.02.015
30. Лісовий кодекс України: Закон України від 21.01.1994 р. № 3852-XII. Верховна Рада України. URL: <https://surl.li/ayobyh> (дата звернення 07.04.2026).
31. Моніторинг лісів за ICP Forests – міжнародні вимоги та національні переваги для України. *Впровадження сталого лісового господарства*. URL: <https://surl.li/uzoyzi> (дата звернення 07.04.2026).
32. Закон України Про внесення змін до Лісового кодексу України щодо проведення національної інвентаризації лісів. URL: <https://surl.li/crgahh> (дата звернення 07.05.2026).
33. Про затвердження Порядку проведення національної інвентаризації лісів та внесення зміни у додаток до Положення про набори даних, які підлягають оприлюдненню у формі відкритих даних. URL: <https://surl.li/tjwxpg> (дата звернення 07.05.2026).
34. ВО «Укрдержліспроект». URL: <https://lisproekt.gov.ua/> (дата звернення 07.05.2026).
35. УкрНДІЛГА. URL: <https://uriffm.org.ua/> (дата звернення 07.05.2026).
36. НІЛ (національна інвентаризація лісів). URL: <https://surl.li/bcibnr> (дата звернення 07.05.2026).
37. Концепції розбудови національної інвентаризації та моніторингу лісів України. URL: <https://surl.li/cc/ggexbx> (дата звернення 07.05.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 09.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 504.03:349.6:330.15

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.34>

ВОЄННИЙ ЕКОЦИД В УКРАЇНІ: НАЦІОНАЛЬНІ ПІДХОДИ ТА МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД ЕКОЛОГО-ПРАВОВОЇ Й ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ ШКОДИ ДОВКІЛЛЮ

Бутенко О.Г.¹, Васютинська К.А.¹, Мельник С.В.¹, Озернюк Г.В.¹,
Кубко В.П., Бизова М.Б.², Даниленко Т.М.¹

¹Національний університет «Одеська політехніка»
пр. Шевченко, 1, 65044, м. Одеса

²Департамент екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації
вул. Канатна, 83, 65007, м. Одеса

butenko@op.edu.ua, e.a.vasutinskaya@op.edu.ua, melnik.s.v@op.edu.ua, ozerniuk.h.v@op.edu.ua,
kubko.valentina@op.edu.ua, 7323964@stud.op.edu.ua, maribizova@ukr.net

У статті досліджено еколого-правові та економічні підходи до оцінювання шкоди довкіллю, заподіяної внаслідок збройної агресії Російської Федерації проти України. Методологічну основу становлять порівняльно-правовий, системний та еколого-економічний підходи, а також аналіз нормативних актів, національних методик і міжнародних звітів. Обґрунтовано, що воєнний вплив на природне середовище має комплексний і кумулятивний характер та може призводити до системної деградації екосистем, втрати біорізноманіття, екосистемних послуг і відновного потенціалу територій. Проаналізовано положення ст. 441 Кримінального кодексу України, ст. 8 Римського статуту Міжнародного кримінального суду та сучасні міжнародні підходи до правового визначення екоциду. Встановлено, що практичне застосування чинних правових норм ускладнюється оціночним характером понять «масове знищення», «екологічна катастрофа», «серйозна», «масштабна» і «довготривала шкода», а також необхідністю доведення умислу та явної надмірності екологічних наслідків порівняно з очікуваною військовою перевагою. Запропоновано розмежовувати правовий та екологічний зміст поняття «екоцид»: правова дефініція має визначати ознаки діяння, необхідні для кримінально-правової кваліфікації, а екологічна оцінка – відображати структурні й функціональні зміни екосистем. Проаналізовано національні методики розрахунку шкоди та встановлено їх переважно компонентний характер. Порівняння українських підходів із методологічними засадами PDNA та практикою RDNA засвідчило потребу доповнення чинної системи екосистемним і відновлювальним блоками. Зроблено висновок, що урахування втрат природного капіталу, екосистемних послуг, довготривалих ризиків і потреб відновлення підвищить доказову цінність оцінок, сприятиме обґрунтуванню репараційних вимог та вдосконаленню планування післявоєнного екологічного відновлення. *Ключові слова:* воєнний екоцид, шкода довкіллю, збройна агресія, еколого-правова оцінка, економічне оцінювання, екосистемний підхід, післявоєнне відновлення.

Wartime ecocide in Ukraine: national approaches and international experience in the legal, environmental, and economic assessment of environmental damage. Butenko O., Vasiutynska K., Melnyk S., Ozerniuk H., Kubko V., Byzova M., Danylenko T.

The article examines environmental-legal and economic approaches to assessing environmental damage caused by the armed aggression of the Russian Federation against Ukraine. The methodological framework combines comparative legal, systems-based, and environmental-economic approaches, together with an analysis of legal instruments, national assessment methodologies, and international reports. It is substantiated that wartime impacts on the environment are complex and cumulative and may result in systemic ecosystem degradation, biodiversity loss, the decline of ecosystem services, and a reduction in the recovery potential of affected territories. The provisions of Article 441 of the Criminal Code of Ukraine, Article 8 of the Rome Statute of the International Criminal Court, and contemporary international approaches to the legal definition of ecocide are analysed. The study establishes that the practical application of the existing legal rules is complicated by the evaluative nature of such concepts as “mass destruction”, “environmental disaster”, and “severe”, “widespread”, and “long-term” damage. Additional difficulties arise from the need to prove intent and the manifest disproportionality of environmental damage in relation to the anticipated military advantage. The article proposes distinguishing between the legal and environmental dimensions of the concept of ecocide. The legal definition should identify the elements of conduct required for its criminal-law classification, whereas environmental assessment should reflect structural and functional changes in ecosystems. The national methodologies for calculating environmental damage are analysed, and their predominantly component-based nature is identified. A comparison of Ukrainian approaches with the methodological principles of the Post-Disaster Needs Assessment (PDNA) and the practice of the Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA) demonstrates the need



to supplement the existing system with ecosystem-based and recovery-oriented components. It is concluded that accounting for losses of natural capital and ecosystem services, long-term risks, and recovery needs would enhance the evidentiary value of environmental assessments, support the substantiation of reparation claims, and improve the planning of post-war environmental recovery. *Key words:* wartime ecocide, environmental damage, armed aggression, environmental-legal assessment, economic assessment, ecosystem approach, post-war recovery.

Постановка проблеми. Збройна агресія Російської Федерації проти України спричинила масштабне забруднення компонентів довкілля, руйнування природних і техногенно-природних систем, деградацію екосистем та втрату біорізноманіття. Значна частина цих наслідків має кумулятивний, довготривалий або потенційно незворотний характер, що актуалізує питання їх кваліфікації як проявів екоциду. Водночас ефективність правового захисту довкілля та майбутніх репараційних механізмів залежить від наявності узгоджених критеріїв визначення такої шкоди, її належного документування й економічного оцінювання.

Актуальність дослідження. Екологічні наслідки збройної агресії Російської Федерації становлять один із найскладніших викликів для системи екологічної безпеки України. Завдана шкода не обмежується пошкодженням окремих компонентів довкілля, а має комплексний і кумулятивний характер, охоплюючи деградацію екосистем, порушення екосистемних зв'язків, втрату біорізноманіття й екосистемних послуг, а також формування довготривалих ризиків для населення та відновлення постраждалих територій.

За таких умов особливого значення набувають правова кваліфікація діянь, що можуть містити ознаки екоциду, належне документування їх екологічних наслідків та економічне оцінювання заподіяної шкоди. Відсутність загальновизнаного визначення екоциду в міжнародному кримінальному праві, оціночний характер критеріїв шкоди довкіллю під час збройних конфліктів і методологічні відмінності між національними та міжнародними системами оцінювання ускладнюють встановлення індивідуальної кримінальної відповідальності, обґрунтування міжнародно-правової відповідальності держави-агресора та визначення обсягу належного відшкодування. Це зумовлює необхідність узгодженого еколого-правового й економічного підходу до фіксації, оцінювання та доказування шкоди, заподіяної довкіллю України внаслідок збройної агресії.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження пов'язане з вирішенням актуального наукового завдання щодо формування узгодженого еколого-правового й економічного підходу до визначення та оцінювання шкоди довкіллю, заподіяної внаслідок збройної агресії. Його розв'язання потребує конкретизації екологічного змісту ознак екоциду, встановлення вимірюваних критеріїв системної деградації екосистем та узгодження цих критеріїв із вимогами кримінально-правової кваліфікації відповідних діянь.

Практична спрямованість роботи полягає у визначенні напрямів удосконалення національних методик документування й економічного оцінювання шкоди з урахуванням втрати біорізноманіття, екосистемних функцій і послуг, відновного потенціалу природних комплексів та довготривалих екологічних ризиків. Отримані результати можуть бути використані для розвитку нормативно-методичного забезпечення оцінювання воєнної шкоди довкіллю, формування належної доказової бази, обґрунтування вимог щодо її відшкодування та планування післявоєнного екологічного відновлення постраждалих територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поняття «екоцид» увійшло до наукового та суспільно-політичного дискурсу у другій половині XX ст. у зв'язку з масштабними наслідками застосування хімічних речовин під час війни у В'єтнамі. Одним із перших термін використав А. Галстон, наголошуючи на необхідності правової оцінки цілеспрямованого руйнування природного середовища [1]. Подальшого міжнародного поширення він набув після Стокгольмської конференції ООН 1972 р., на якій екологічні наслідки воєнних дій були визначені як загроза не лише окремим державам, а й людству загалом [2]. Водночас упродовж тривалого періоду екоцид залишався переважно етико-політичною та екологічною категорією, не набувши усталеного змісту в міжнародному кримінальному праві.

У сучасних зарубіжних дослідженнях основна увага зосереджена на можливості визнання екоциду окремим міжнародним злочином. П. Гітінс, Д. Шорт і Н. Саут обґрунтовують необхідність запровадження самостійної правової норми, спрямованої на захист екосистем від найбільш небезпечних форм антропогенного впливу [3]. Д. Робінсон, аналізуючи перспективи включення екоциду до Римського статуту Міжнародного кримінального суду, звертає увагу на складність визначення об'єктивних ознак такого злочину та необхідність дотримання принципу правової визначеності [4]. У працях авторів [5, 6] проблема розглядається ширше, у контексті антропоцену, зміни співвідношення між інтересами людини та цінністю природних систем, а також можливого переходу від антропоцентричної до екоцентричної моделі кримінально-правової охорони довкілля.

Ознаки поступового посилення кримінально-правового захисту довкілля простежуються і в законодавстві Європейського Союзу. Директива (ЄС) 2024/1203 розширює перелік екологічних кримінальних правопорушень та передбачає посилення відповідальності за діяння, наслідком яких є значна, тривала або масштабна шкода природному середо-

вищу [7]. Хоча документ не закріплює екоцид як окремий склад злочину, застосовані в ньому підходи відображають загальну тенденцію до криміналізації найбільш тяжких форм руйнування довкілля. Для України ці положення мають значення як орієнтир подальшого наближення кримінального й екологічного законодавства до права Європейського Союзу.

У вітчизняній правовій науці дослідження екоциду суттєво активізувалися після початку повномасштабної збройної агресії Російської Федерації. О. М. Борщевська розглядає специфіку складу екоциду в умовах збройного конфлікту та наголошує на тому, що надмірна «оціночність» законодавчих формулювань ускладнює встановлення об'єктивної і суб'єктивної сторін злочину [8]. Ю. Власенко акцентує на фрагментарності міжнародних і національних механізмів правового регулювання та необхідності їх подальшого узгодження [9]. У дослідженні авторів [10] російсько-українська війна розглядається як показовий приклад обмеженої спроможності чинного міжнародного гуманітарного права забезпечити належну правову реакцію на масштабну шкоду довкіллю.

Окремий напрям наукових праць становлять дослідження фактичних екологічних наслідків війни. В роботі [11] проаналізовано забруднення природних компонентів, деградацію екосистем, втрати біорізноманіття та формування довготривалих екологічних ризиків. Автором роботи [12] досліджені загрози для територій і об'єктів природно-заповідного фонду, звертаючи увагу на порушення просторової цілісності природоохоронної мережі. Результати цих робіт свідчать, що наслідки воєнних дій не можуть бути повноцінно відображені виключно через облік забруднення окремих природних ресурсів, оскільки охоплюють структурні та функціональні зміни екосистем.

Проблеми економічного оцінювання воєнної шкоди довкіллю висвітлено у [13], де систематизовано наслідки війни для ґрунтів, водних ресурсів, лісів, аграрних і біологічних систем. Авторами [14] наголошено на необхідності застосування сучасних технологій збору й опрацювання даних, а також урахування довготривалих наслідків під час визначення розміру екологічних збитків, натомість, в роботі [15] охарактеризовані методологічні відмінності між національними розрахунками та міжнародними підходами до визначення шкоди, втрат і потреб відновлення.

Питання адаптації міжнародного досвіду до українських умов розглянуто в роботі [16]. Автори характеризують воєнний вплив як кумулятивний процес, у якому фізичне руйнування природних об'єктів поєднується з тривалим хімічним забрудненням та відкладеними екологічними наслідками. У цьому контексті стандартизація процедур документування й оцінювання шкоди набуває особливого значення, оскільки визначає доказову придатність розрахунків

для національних і міжнародних правових механізмів.

Показовим прикладом комплексного дослідження наслідків воєнного руйнування є оцінка змін, спричинених знищенням Каховської ГЕС. У матеріалах Української природоохоронної групи проаналізовано трансформацію водних і наземних екосистем, зміну гідрологічного режиму, перенесення забруднювальних речовин, втрати біорізноманіття та особливості природного відновлення території колишнього водосховища [17]. Це дослідження підтверджує, що екологічна шкода від воєнних дій має складну просторово-часову структуру, а її наслідки можуть змінюватися в процесі природної сукцесії та господарського освоєння територій.

Отже, у сучасній літературі сформувалися три взаємопов'язані напрями визначення екоциду: кримінально-правовий, екосистемний та еколого-економічний. Перший охоплює питання юридичного визначення екоциду й механізмів відповідальності; другий – оцінювання деградації екосистем, втрат біорізноманіття та порушення природних функцій; третій – визначення економічного еквівалента шкоди, втрат природного капіталу та потреб відновлення. Водночас недостатньо опрацьованим залишається поєднання цих напрямів у межах єдиного підходу, придатного одночасно для екологічного аналізу, правового доказування та економічного обґрунтування відшкодування шкоди.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Аналіз сучасних досліджень свідчить, що проблема екоциду, зокрема воєнного, активно розглядається у правовій, екологічній та еколого-економічній площинах. Водночас недостатньо узгодженими залишаються критерії, за якими масштабна шкода довкіллю під час збройного конфлікту може бути кваліфікована саме як воєнний екоцид. Наявні правові підходи значним чином спираються на оціночні категорії, які включають масштабність, довготривалість, надмірність шкоди, очікувана військова перевага, що ускладнює їх практичне застосування та доведення відповідальності.

Окремою невирішеною проблемою є поєднання правової кваліфікації воєнного екоциду з екологічним змістом цього явища та економічною оцінкою завданої шкоди. У чинних підходах недостатньо враховано системні наслідки для екосистем: порушення екосистемних зв'язків, втрату біорізноманіття, зменшення обсягу екосистемних послуг, довготривалі ризики та витрати на відновлення природних комплексів. Це зумовлює потребу в узгодженому еколого-правовому й економічному підході до фіксації, оцінювання та обґрунтування шкоди довкіллю, завданої воєнним екоцидом, з урахуванням національного досвіду України та міжнародних стандартів.

Метою роботи є обґрунтування еколого-правових та економічних підходів до оцінювання шкоди довкіллю України внаслідок збройної агресії та

пов'язаної з діями, що можуть містити ознаки екоциду. Досягнення мети ґрунтується на аналізі національної практики документування й розрахунку екологічної шкоди, міжнародних підходів до кваліфікації злочинів проти довкілля та методологічних засад оцінювання втрат і потреб післявоєнного відновлення.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання: проаналізувати підходи до розуміння екоциду в національному та міжнародному праві; виявити обмеження положень ст. 441 Кримінального кодексу України і Римського статуту Міжнародного кримінального суду щодо правової кваліфікації масштабної шкоди довкіллю під час збройного конфлікту; обґрунтувати екосистемний підхід до встановлення екологічних наслідків діянь, що можуть містити ознаки екоциду; оцінити придатність національних методик розрахунку шкоди для формування доказової бази та обґрунтування вимог щодо її відшкодування; визначити напрями узгодження українських методик із міжнародними підходами до оцінювання шкоди, втрат і потреб відновлення.

Наукова новизна дослідження полягає в розвитку міждисциплінарного підходу до оцінювання шкоди довкіллю, заподіяної внаслідок збройної агресії, на основі поєднання правових критеріїв екоциду, екосистемних показників деградації природних комплексів та економічних параметрів шкоди, втрат і потреб відновлення.

Уточнено розмежування правового та екологічного змісту поняття «екоцид». Правова характеристика має забезпечувати визначеність ознак діяння, необхідних для його кримінально-правової кваліфікації, тоді як екологічна – відображати вимірювані зміни структури, функціонування та відновного потенціалу екосистем. Обґрунтовано, що під час встановлення екологічних наслідків діянь, які можуть містити ознаки екоциду, поряд із масштабом і тривалістю шкоди необхідно враховувати порушення цілісності екосистем, втрату біорізноманіття й екосистемних функцій, скорочення обсягу екосистемних послуг та обмеження природного відновлення.

Набуло подальшого розвитку обґрунтування напрямів удосконалення національної системи оцінювання воєнної шкоди довкіллю. Встановлено, що компонентні методики розрахунку доцільно доповнити екосистемним і відновлювальним блоками, які охоплюватимуть втрати природного капіталу та екосистемних послуг, наслідки мінущання й розмінування, довготривале забруднення, деградаційні процеси та витрати на відновлення природних комплексів. Таке доповнення сприятиме підвищенню доказової придатності результатів оцінювання для обґрунтування вимог щодо відшкодування шкоди та планування післявоєнного екологічного відновлення.

Методологічне значення роботи полягає в обґрунтуванні міждисциплінарного підходу до

дослідження воєнного екоциду на перетині екології, кримінального права та економіки природокористування. Запропонований підхід дає змогу розглядати екоцид не лише як правову категорію, пов'язану з кваліфікацією злочинів проти довкілля, а й як форму системної деградації екосистем, що потребує науково обґрунтованої екологічної інтерпретації та економічної оцінки завданої шкоди.

Практичне значення результатів дослідження полягає в можливості їх використання для удосконалення національного законодавства, зокрема для уточнення положень ст. 441 Кримінального кодексу України щодо змісту й ознак екоциду; для розвитку міжнародної дискусії про криміналізацію екоциду та його можливе включення до Римського статуту Міжнародного кримінального суду; а також для гармонізації українських методів оцінювання екологічних збитків із міжнародними підходами до визначення шкоди, втрат і потреб відновлення. Це має важливе значення для формування належної доказової бази, обґрунтування репараційних вимог і забезпечення матеріальної відповідальності держави-агресора за шкоду, заподіяну довкіллю України.

Викладення основного матеріалу. Дослідження воєнного екоциду потребує поєднання правового, екологічного та економічного підходів. Це дає змогу розглядати шкоду довкіллю, спричинену збройною агресією, не лише як сукупність пошкоджень окремих природних компонентів, а і як можливий прояв системної деградації екосистем із довготривалими наслідками для біорізноманіття, екосистемних функцій і відновного потенціалу територій.

Україна належить до держав, кримінальне законодавство яких передбачає відповідальність за екоцид. Відповідно до ст. 441 Кримінального кодексу України екоцидом визнаються «масове знищення рослинного або тваринного світу, отруєння атмосфери або водних ресурсів, а також вчинення інших дій, що можуть спричинити екологічну катастрофу» [18]. Водночас практичне застосування цієї норми ускладнюється через оціночний характер понять «масове знищення» та «екологічна катастрофа», а також через відсутність чітких критеріїв їх визначення. Диспозиція статті прямо охоплює не всі компоненти й форми пошкодження довкілля, характерні для воєнних дій, зокрема деградацію ґрунтів, руйнування ландшафтів, фрагментацію природних територій, мінущання та порушення екосистемних зв'язків.

З екологічного погляду наслідки збройної агресії можуть проявлятися не лише у забрудненні або знищенні окремих природних ресурсів, а й у порушенні цілісності та функціонування екосистем. Руйнування промислових і гідротехнічних об'єктів, пожежі, вибухове навантаження та забруднення природних середовищ здатні спричиняти структурні зміни природних комплексів, втрату біорізноманіття й екосистемних функцій, а також зниження здатності територій до самовідновлення. Тому оцінювання

діянь, що можуть містити ознаки екоциду, має враховувати системність, тривалість і просторовий масштаб екологічних наслідків.

Міжнародно-правові механізми відповідальності за шкоду довкіллю під час збройних конфліктів мають істотні обмеження. Римський статут Міжнародного кримінального суду не передбачає екоцид як окремий злочин, однак ст. 8 відносить до воєнних злочинів умисний напад, вчинений з усвідомленням того, що він спричинить масштабну, довготривалу та серйозну шкоду довкіллю, явно надмірну порівняно з очікуваною конкретною і безпосередньою загальною військовою перевагою [19]. Застосування цієї норми ускладнюється необхідністю доведення умислу, усвідомлення можливих наслідків і «явної надмірності» шкоди. Особливо проблемним є зіставлення довготривалих або незворотних екологічних втрат із військовою перевагою, оскільки частина наслідків руйнування природних і техногенно-природних систем виявляється лише з часом та впливає на безпеку населення, стан екосистем і можливості післявоєнного відновлення територій.

Окреме місце в міжнародній дискусії посідає визначення, запропоноване Незалежною експертною групою з правового визначення екоциду (Stop Ecocide International). Відповідно до нього екоцидом визнаються незаконні або свавільні дії, вчинені з усвідомленням істотної ймовірності заподіяння серйозної та широкомасштабної або довготривалої шкоди довкіллю [20]. Водночас використані у визначенні поняття залишаються оціночними, а їх практичне застосування потребує конкретизації за допомогою вимірюваних екологічних показників.

З огляду на це, доцільно розмежовувати правовий та екологічний зміст поняття «екоцид». Правова дефініція має визначати ознаки діяння, необхідні для його кримінально-правової кваліфікації, тоді як екологічна оцінка – відображати масштаб, тривалість і системність змін у структурі, функціонуванні та відновному потенціалі екосистем. Встановлення таких змін має ґрунтуватися на даних моніторингу, польових і лабораторних досліджень, дистанційного зондування Землі та еколого-економічного оцінювання.

У чинній статті запропоновано розглядати *воєнний екоцид як широкомасштабний та/або довготривалий негативний вплив, зумовлений збройним конфліктом, що спричиняє системне порушення структури й функціонування екосистем*. Такий вплив може виявлятися у забрудненні природних компонентів, знищенні об'єктів рослинного і тваринного світу, руйнуванні середовищ існування та порушенні екосистемних зв'язків, наслідком чого є деградація природних комплексів, втрата біорізноманіття й екосистемних послуг, а також зниження їхнього відновного потенціалу.

Запропоноване трактування зміщує акцент з окремих видів забруднення та пошкодження природ-

них ресурсів на оцінювання екосистем як цілісної функціональної системи. Об'єктом аналізу стають не лише зміни стану повітря, вод і ґрунтів, а й втрата регулювальних, ресурсних, середовищевісних і рекреаційних функцій, порушення природних зв'язків та зниження екологічної стійкості території. Це дає змогу обґрунтовувати системний характер шкоди, заподіяної довкіллю внаслідок збройної агресії.

Економічне оцінювання шкоди довкіллю є необхідною складовою документування наслідків збройної агресії, формування доказової бази та обґрунтування вимог щодо її відшкодування. Після початку повномасштабного вторгнення в Україну було сформовано нормативно-методичну базу для розрахунку шкоди, заподіяної атмосферному повітрю, землям і ґрунтам, водним ресурсам, морському середовищу, надрам, лісовому фонду та об'єктам природно-заповідного фонду [21]. Зазначені методики забезпечують первинну фіксацію та грошове оцінювання екологічних наслідків бойових дій.

За даними Державної екологічної інспекції України, станом на 05.06.2026 загальний розмір шкоди, завданої довкіллю внаслідок збройної агресії, становив близько 6,99 трлн грн [22]. З них, як показано на рис. 1, найбільші обсяги збитків (4,36 трлн грн) пов'язані із пошкодженням земельних і водних ресурсів, атмосферного повітря, територій природно-заповідного фонду.

Збитки від забруднення атмосферного повітря переважно зумовлені пожежами. Найбільший

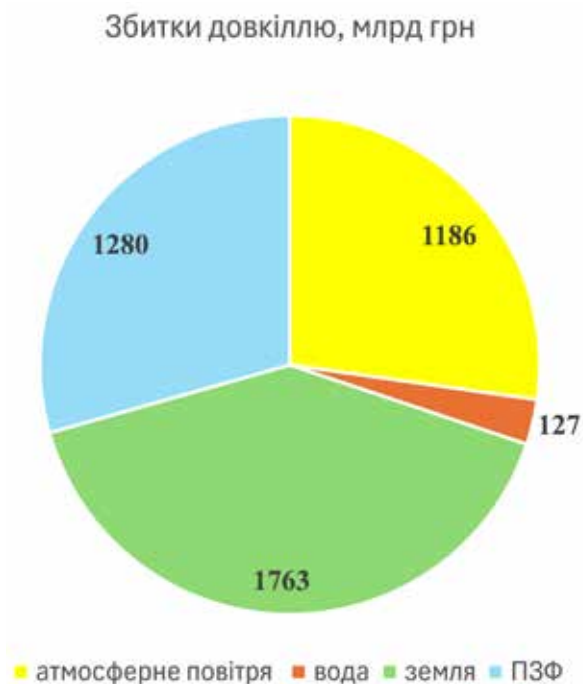


Рис. 1. Структура максимальних збитків довкіллю внаслідок збройної агресії РФ за період 24.02.2022 – 05.06.2026

внесок припадає на лісові пожежі, що оцінюються у 1000 млрд грн, із приростом від початку року на 38,1 млрд грн [23]. Збитки від горіння нафтопродуктів становлять 179,6 млрд грн (+ 4,1 млрд грн), від інших загорянь 6,4 млрд грн (+0,1 млрд грн).

Збитки, завдані водним об'єктам, формуються за рахунок їх забруднення, засмічення та самовільного використання водних ресурсів. Забруднення вод оцінюється у 82,0 млрд грн (+6,2 млрд грн), самовільне використання водних ресурсів у 35,0 млрд грн, засмічення у 9,8 млрд грн.

У структурі шкоди земельним ресурсам переважає засмічення земель, що становить 1740 млрд грн (+430 млрд грн). Забруднення ґрунтів оцінюється у 22,9 млрд грн (+0,6 млрд грн).

Шкода природно-заповідному фонду охоплює пошкодження рослинного світу на суму 275,7 млрд грн, знищення тварин на 0,163 млрд грн, а також знищення та пошкодження дерев і рослин на 1004 млрд грн.

Отже, найбільші обсяги розрахованої шкоди пов'язані із засміченням земель, знищенням і пошкодженням рослинності та наслідками лісових пожеж, що засвідчує значний вплив бойових дій на земельні ресурси й природні екосистеми. Отримані оцінки мають практичне значення для документування екологічних наслідків збройної агресії та формування доказової бази для правових і репараційних процедур.

Водночас чинні національні методики мають переважно компонентний характер: шкода атмосферному повітрю, водам, землям і ґрунтам, надрам, лісовому фонду та природно-заповідним територіям визначається окремо [12; 21]. Такий підхід забезпечує облік конкретних видів пошкодження, однак не повною мірою відображає взаємопов'язані та кумулятивні наслідки деградації екосистем. Зокрема, недостатньо врахованими залишаються втрати екосистемних послуг, порушення екосистемних зв'язків, деградація середовищ існування, ерозійні процеси, довготривале хімічне забруднення, наслідки мінування й розмінування територій, а також витрати на відновлення екологічної рівноваги.

Міжнародні підходи до оцінювання наслідків збройних конфліктів і катастроф охоплюють не лише визначення прямої шкоди та втрат, а й оцінювання потреб відновлення. Методологія PDNA (Post-Disaster Needs Assessment) застосовується для комплексного визначення пошкоджень, втрат і потреб після катастроф, тоді як формат RDNA (Rapid Damage and Needs Assessment), адаптований до умов України, забезпечує їх оперативне оцінювання. Ці підходи, що використовуються Світовим банком, Європейським Союзом та Організацією Об'єднаних Націй, передбачають урахування стану природних систем, біорізноманіття, лісів, природного капіталу та екосистемних послуг у процесі планування відновлення [24].

Екологічні наслідки збройної агресії проти України виходять за межі національної безпеки та можуть мати транскордонний характер. Забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів і ґрунтів, деградація екосистем, втрата біорізноманіття та вплив на басейн Чорного моря створюють ризики для інших держав регіону. У комплексному звіті щодо оцінювання екологічної шкоди в Україні наголошено на необхідності системного міжнародного моніторингу деградації екосистем, забруднення природних ресурсів і довготривалих загроз довкіллю [25]. Це дає підстави розглядати наслідки війни як складову міжнародної екологічної безпеки.

Міжнародна практика оцінювання шкоди дедалі ширше спирається на екосистемний підхід. Відповідно до концепції екосистемних послуг Р. Костанци та співавторів [26], природні системи мають екологічну, економічну й соціальну цінність, тому оцінювання має охоплювати не лише прямі втрати ресурсів, а й зниження здатності екосистем очищувати воду й повітря, регулювати кліматичні процеси, підтримувати біорізноманіття та забезпечувати рекреаційні функції. Поєднання національних методик із такими підходами сприятиме уніфікації моніторингу, оцінюванню втрат природного капіталу й екосистемних послуг, підвищенню доказової цінності розрахунків та обґрунтуванню потреб післявоєнного екологічного відновлення.

Порівняння національних і міжнародних підходів виявляє істотні методологічні відмінності. За звітом RDNA5, шкоду довкіллю та пов'язані з нею втрати за період із лютого 2022 р. до лютого 2025 р. оцінено у 36 млрд дол. США, тоді як розрахований за національними методиками показник Державної екологічної інспекції України за аналогічний період у валютному еквіваленті становив понад 65 млрд дол. США [27]. Різниця між наведеними оцінками зумовлена не лише обсягом зафіксованої шкоди, а й відмінностями об'єктів, структури показників і способів розрахунку. Українські методики переважно визначають грошовий розмір шкоди окремим компонентам довкілля, тоді як RDNA розмежовує пошкодження, втрати та потреби відновлення. Така методологічна неузгодженість може ускладнювати зіставлення результатів і їх використання для формування доказової бази та обґрунтування репараційних вимог.

Узагальнену модель оцінювання шкоди довкіллю внаслідок збройної агресії наведено на рис. 2. Вона відображає взаємозв'язок між воєнними чинниками, екологічними наслідками, правовою кваліфікацією, економічним оцінюванням та використанням отриманих результатів для обґрунтування репараційних вимог і планування відновлення.

Таким чином, удосконалення національної системи оцінювання шкоди має полягати не у відмові від чинних компонентних методик, а в їх доповненні екосистемним і відновлювальним блоками. Вони мають



Рис. 2. Еколого-правова та економічна модель оцінювання шкоди довкіллю внаслідок воєнного екоциду

охоплювати втрати екосистемних послуг, витрати на відновлення природних комплексів, довготривалі ризики, показники екологічної стійкості та відновного потенціалу екосистем. Такий підхід сприятиме узгодженню національної практики з міжнародними методологічними засадами та підвищенню доказової цінності оцінок для репараційних процедур.

Головні висновки. Воєнний вплив на довкілля України має комплексний і кумулятивний характер, а окремі діяння та їх наслідки можуть містити ознаки екоциду. Тому оцінювання заподіяної шкоди має охоплювати не лише забруднення або знищення окремих природних ресурсів, а й порушення структури та функціонування екосистем, втрату біорізноманіття й екосистемних послуг, зниження екологічної стійкості та відновного потенціалу природних комплексів.

Аналіз положень ст. 441 Кримінального кодексу України та ст. 8 Римського статуту Міжнародного кримінального суду засвідчив недостатню визначеність критеріїв масштабної, серйозної та довготривалої шкоди довкіллю. Оціночний характер відповідних понять ускладнює кримінально-правову кваліфікацію діянь і доведення системності їх екологічних наслідків. Це зумовлює необхідність розроблення вимірюваних кількісних і якісних показників стану екосистем, які можуть бути використані під час документування та правового оцінювання шкоди.

Чинні українські методики забезпечують первинну фіксацію та компонентне оцінювання шкоди, однак не повною мірою враховують втрати природного капіталу, екосистемних послуг, довготривалі ризики та потреби відновлення. У зв'язку з цим національну систему доцільно доповнити екосистемним і відновлювальним блоками та узгодити її з методологічними засадами PDNA і практикою RDNA. Водночас поєднання різних підходів має передбачати чітке розмежування шкоди, втрат і потреб відновлення, а також механізми запобігання їх подвійному врахуванню.

Перспективи використання результатів. Запропонований підхід може бути використаний для вдосконалення нормативно-методичного забезпечення документування й оцінювання шкоди, формування належної доказової бази, обґрунтування міжнародно-правової відповідальності держави-агресора та визначення обсягу належного відшкодування. Його практичне застосування є важливим як в умовах зростання техногенних та екологічних загроз, спричинених війною, так і під час післявоєнного відновлення територій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення кількісних критеріїв системної деградації екосистем, уніфікацію процедур оцінювання та обґрунтування заходів із відтворення екосистемних функцій і підвищення екологічної безпеки.

Література

1. Galston, A. W. Speech at the Conference on War and National Responsibility (Washington, February 25–27, 1970). In: Independent Expert Panel for the Legal Definition of Ecocide. Commentary and Core Text. 2021. URL: https://www.obsant.eu/wpcontent/uploads/2021/06/ecocide_definition_Law_commentary_core_text_ExpertPanel.pdf (дата звернення: 31.05.2026).
2. One people, one planet; in peace. *United Nations Environment Programme*. URL: <https://www.unep.org/news-and-stories/speech/one-people-one-planet-peace> (дата звернення: 31.05.2026).
3. Higgins P., Short D., South N. Protecting the planet: a proposal for a law of ecocide. *Crime, Law and Social Change*. 2013. Vol. 59, № 3. P. 251–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10611-013-9413-6>
4. Robinson D. Ecocide – Puzzles and Possibilities. *Journal of International Criminal Justice*. 2022. Vol. 20, № 2. P. 313–347. DOI: <https://doi.org/10.1093/jicj/mqac021>
5. Branch A., Minkova L. Ecocide, the anthropocene, and the international criminal court. *Ethics & International Affairs*. 2023. Vol. 37, № 1. P. 51–79. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0892679423000059>
6. Stucki S. Towards a Theory of Ecocide: Legal, Political, and Philosophical Dimensions. *International Criminal Law Review*. 2022. Vol. 22, № 4. P. 555–584. DOI: <https://doi.org/10.1163/15718123-bja10136>
7. European Parliament. Directive (EU) 2024/1203 on the protection of the environment through criminal law and replacing Directives 2008/99/EC and 2009/123/EC. *Official Journal of the European Union*. Brussels, 2024. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401203 (дата звернення: 31.03.2026).
8. Борщевська О. М. Публічно-правові та приватноправові аспекти визначення дефініції «екоцид» під час військової агресії. *Правова держава*. 2023. № 49. С. 113–129. DOI: <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2023.49.276017>
9. Власенко Ю. International and national legal regulation of ecocide: retrospective analysis and current state. *Visegrad Journal on Human Rights*. 2024. № 5. DOI: <https://doi.org/10.61345/1339-7915.2024.5.23>
10. Дуїнова Т., Возник М., Корецький С., Чернецька О., Шилингов В. International humanitarian law and ecocide: the war in Ukraine as a case study. *European Journal of Environmental Sciences*. 2024. Vol. 14, № 1. DOI: <https://doi.org/10.14712/23361964.2024.2>
11. Бондар О. І., Гандзюра В. П., Матвієнко М. Г. Вплив воєнних дій та їх наслідків на довкілля України. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 1(52), Т. 1. С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.1>
12. Роман Л. Ю. Аналіз екологічних загроз об'єктів ПЗФ України у воєнний період. *Екологічні науки*. 2022. Вип. 3(42). С. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.13>
13. Stokral V., Berezhniak Y., Naumovska O., Vahaliuk L., Ladyka M., Pavliuk S., Palamarchuk S., Serbeniuk H. Natural resources of Ukraine: consequences and risks of Russian aggression. *Biological Systems: Theory and Innovation*. 2024. Vol. 15, No 1. P. 37–60. DOI: [https://doi.org/10.31548/biologiya15\(1\).2024.004](https://doi.org/10.31548/biologiya15(1).2024.004)
14. Polukarov Yu., Kachynska N., Polukarov O., Zemlyanska O., Mitiuk L. Impact of the full-scale war in Ukraine on the environment: Environmental damage assessment. *Law: Human. Environment*. 2024. Vol. 15, No 1. P. 85–100. DOI: <https://doi.org/10.31548/law/1.2024.85>
15. Харченко В.В., Котинський А.В., Якименко І.Л. Цілеспрямоване злочинне знищення довкілля України як наслідок російської агресії. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 6(57). С. 116–120. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.17>
16. Шарий Г. І., Козлов В. В. Міжнародні стандарти оцінки екологічної шкоди: потенціал, обмеження та перспективи адаптації в умовах збройного конфлікту в Україні. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 6(63). С. 154–159. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.6-63.25>
17. Знищення Каховського водосховища: наслідки для довкілля / Українська природоохоронна група. Київ, 2025. 114 с. URL: <https://uncg.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/znyshhennya-kahovskogo-vodoshovyshsha-naslidky-dlya-dovkillya-2025.pdf> (дата звернення: 31.05.2026).
18. Кримінальний кодекс України: Закон України від 5 квіт. 2001 р. № 2341-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2341-14#Text> (дата звернення: 01.06.2026).
19. Римський статут Міжнародного кримінального суду: від 17 липня 1998 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_588#Text (дата звернення: 31.05.2026).
20. June 2021: historic moment as Independent Expert Panel launches definition of ecocide. *Stop Ecocide International*. URL: <https://www.stopecocide.earth/legal-definition> (дата звернення: 03.06.2026).
21. Методики розрахунку розмірів шкоди, внаслідок надзвичайних ситуацій та/або під час дії воєнного стану. *Державна екологічна інспекція України*. URL: <https://www.dei.gov.ua/post/2309> (дата звернення: 31.05.2026).
22. Оновлена щотижнева інфографіка про збитки, завдані довкіллю внаслідок збройної агресії рф станом на 05.06.2026 року. *Державна екологічна інспекція України*. URL: <https://www.dei.gov.ua/post/3565> (дата звернення: 31.05.2026).
23. Оновлена щотижнева інфографіка про збитки, завдані довкіллю внаслідок збройної агресії рф станом на 23.01.2026 року. *Державна екологічна інспекція України*. URL: <https://www.dei.gov.ua/post/оновлена-shchotizhneva-infografika-pro-zbitki-zavdani-dovkillyu-23-01-2026> (дата звернення: 31.05.2026).
24. Ukraine. Fifth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA5): february 2022 – february 2025. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022026094036395/pdf/P514499-22f93f3a-4278-42bc-b907-db9553d12069.pdf> (дата звернення: 31.03.2026).
25. Informal Inter-Agency Coordination Group on Environmental Assessments. *Comprehensive Report on Ukraine Environmental Damage Assessments*. Geneva : UNECE, 2023. December. URL: https://unece.org/sites/default/files/2024-02/Comprehensive%20Report_Ukr%20Env%20Damage%20Assessments_IACG_Dec.%202023.pdf (дата звернення: 18.06.2026).
26. Costanza R., d'Arge R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K., Naeem S., O'Neill R. V., Paruelo J., Raskin R. G., Sutton P., van den Belt M. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*. 1997. Vol. 387. P. 253–260. DOI: <https://doi.org/10.1038/387253a0>.
27. Оновлена щотижнева інфографіка про збитки, завдані довкіллю внаслідок збройної агресії рф станом на 07.02.2025 року. *Державна екологічна інспекція України*. URL: <https://www.dei.gov.ua/post/3082> (дата звернення: 31.05.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

СТРАТЕГІЯ АДАПТАЦІЇ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ

Буяльська Н.П., Костенко І.А., Орда Б.Є., Цибуля С.Д., Челябієва В.М.

Національний університет «Чернігівська політехніка»

вул. Шевченка, 95, 14035, м. Чернігів

buialska@stu.cn.ua, atdrj@stu.cn.ua, woodenpies@stu.cn.ua, s.tsybulia@stu.cn.ua, vika.chl@stu.cn.ua

У статті представлена стратегія адаптації харчової промисловості України до зміни клімату. Незважаючи на пильну увагу до проблем, що виникають у різних галузях промислового виробництва в умовах зміни клімату, для харчової промисловості така стратегія раніше не була розроблена. Тим не менш, її необхідність визначається продовольчою безпекою, рівень якої знижується через кліматичні зміни. Таким чином, створення такої стратегії – це актуальне завдання. Під час розробки стратегії використано комплексний міждисциплінарний підхід. Розроблена стратегія включає 5 цілей, таких як: 1. Посилення адаптаційних спроможностей шляхом покращення нормативно-правового забезпечення в сфері харчової промисловості; 2. Оптимізація виробничих процесів для зменшення викидів та впливу харчового сектору на зміну клімату; 3. Підвищення обізнаності та рівня знань працівників харчових виробництв; 4. Покращення науково-методичного забезпечення відповідного сектору; 5. Рекомендація або розробка і проведення заходів, які потенційно можуть допомогти в адаптації харчової промисловості до змін клімату на рівні окремих підприємств, а також територіальних громад. Для кожної цілі розроблено відповідні завдання. У статті наведений перелік основних заходів адаптації з реалізації розробленої стратегії. Він включає наступні заходи: 1. Проведення диверсифікації постачальників сировини; 2. Загальна диверсифікація сировини; 3. Підвищення енергетичної стійкості харчових підприємств; 4. Використання вторинної сировини; 5. Проведення аудитів, спрямованих на оптимізацію організаційної складової виробництва харчової продукції за умов зміни клімату; 6. Аналіз ризиків. Наведено результати, які слід очікувати від реалізації розробленої стратегії. Вказано можливі джерела фінансування заходів для досягнення поставлених цілей. Термін реалізації запропонованої стратегії – 2040 рік. Розроблена стратегія може стати орієнтиром під час планування заходів для адаптації харчової промисловості до зміни клімату не лише на рівні країни, а й окремих промислових підприємств. *Ключові слова:* зміна клімату, продовольча безпека, стратегія адаптації до зміни клімату.

Strategy for adaptation of the food industry of Ukraine to climate change. Buialska N., Kostenko I., Orda B., Tsybulia S., Cheliabieva V.

The article presents a strategy for adapting food industry of Ukraine to climate change. Despite the close attention paid to the challenges, which various sectors of industrial production face in the context of climate change, no such strategy has previously been developed for the food industry. However, the need for it is determined by the deterioration of food security due to climate change. Therefore, developing such a strategy is an urgent task. A comprehensive, interdisciplinary approach was used in developing the strategy. The developed strategy includes five goals, such as: 1. Strengthening the adaptive capacity by improving the regulatory framework in the food industry; 2. Optimizing production processes to reduce emissions and the impact of the food sector on climate change; 3. Increasing the awareness and knowledge of food industry workers; 4. Improving scientific and methodological support for the relevant sector; 5. Developing or implementing measures that can help in the adaptation of the food industry to climate change at the level of individual enterprises, as well as territorial communities. Corresponding objectives were developed for each goal. The article provides a list of the main adaptation measures for the implementation of the developed strategy. It includes the following activities: 1. Diversification of raw material suppliers; 2. General diversification of raw materials; 3. Increasing the energy sustainability of food industry enterprises; 4. Use of secondary raw materials; 5. Conducting audits aimed at optimizing the organizational component of food production in the context of climate change; 6. Risk analysis. The expected results of implementing the developed Strategy are presented. Potential sources of funding for measures to achieve the stated goals are indicated. The proposed strategy's implementation deadline is 2040. The developed strategy can serve as a guideline for planning measures to adapt the food industry to climate change not only at the national level but also for individual industrial enterprises. *Key words:* climate change, food security, climate change adaptation strategy.

Постановка проблеми. З початку промислових революцій середня світова температура значно зросла (приблизно на 1,13–1,17 °C). Зміна клімату серйозно загрожує екологічній, економічній та соціальній стабільності світу. В результаті зміни клімату більшість секторів економіки напряму або опосеред-

ковано стикаються з проблемами та несуть збитки. З одного боку це відбувається у зв'язку з суто об'єктивними факторами, але і в той самий час через недостатній рівень готовності до них. Самі підприємства при цьому часто є як джерелами антропогенного впливу, так і відчувають на собі наслідки



своїєї ж діяльності, недаленовидного менеджменту та внутрішньої політики. Це спонукає їх змінювати підходи, пом'якшувати власний вплив на довкілля та адаптуватися до зміни клімату, орієнтуючись також на запити суспільства. Для цього на рівні окремих галузей необхідною є розробка стратегій адаптації до зміни клімату. При цьому досліджуються всі етапи виробництва, їх вплив на довкілля, економічні спроможності та засоби адаптації.

Метою роботи було розробити стратегію адаптації харчової промисловості України до зміни клімату.

Актуальність дослідження. На сьогоднішній день питання пов'язані зі зміною клімату набувають все більшої актуальності. Ефекти від такої різкої зміни клімату з'являються досить швидко. Існує ймовірність виникнення ряду негативних наслідків з часом, таких як збільшення частоти теплових хвиль, частоти виникнення повеней та затоплень, збільшення кількості шкідників та хвороб, загострення водної кризи і перерозподілу агрокліматичних зон. Всі ці ризики вимагають розробки стратегій адаптації різних галузей промисловості з урахуванням потенційних змін і тенденцій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Адаптація країни до зміни клімату в цілому та різних галузей промисловості зокрема є важливим завданням. Розробка стратегії адаптації харчової промисловості узгоджується зі стратегією екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року, яка затверджена Кабінетом Міністрів України (від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням, пов'язаним із зниженням рівня продовольчої безпеки через зміну клімату, присвячено досить велика кількість наукових праць. У тому числі, розглядаються заходи адаптації. Так, наголошується, що першочерговими заходами для адаптації до зміни клімату у сфері продовольчої безпеки необхідно розглядати інституційне управління та заходи державного регулювання [1]. Показано, що вирощування багатолітніх рослин, особливо трав'янистих багаторічників, для заміни однорічних культур є важливим напрямом для підтримки продовольчої безпеки в умовах зміни клімату [2]. Одночасно з адаптацією до зміни клімату пропонується використовувати заходи для пом'якшення кліматичних змін [3]. Вказується важливість адаптацій до зміни клімату на регіональному рівні [4]. Для вирішення існуючих перешкод до повноцінної адаптації необхідно збільшувати інвестиції, покращувати інфраструктуру, проводити узгоджену політику та підтримку вразливих груп населення [5].

Як основні напрями адаптації до зміни клімату продовольчого сектора вказуються кліматично стійке сільське господарство, інтеграція традиційних знань, стійке землекористування та впровадження відновлюваних джерел енергії. Наголошується на критич-

ній ролі кліматичного фінансування, міжнародного співробітництва для забезпечення сталої сільськогосподарської трансформації [6]. Для адаптації до зміни клімату зростає інтерес до стійких видів рослин, включаючи ті, які мають природну стійкість до стресу, а також до альтернативних джерел рослинного білка, у тому числі, що одержується з інвазійних видів [7].

Загалом дослідження показують, що продовольча безпека в умовах зміни клімату може бути забезпечена та покращена лише за допомогою комплексу заходів, що охоплюють усі види діяльності, від виробництва до розподілу [8].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Харчова промисловість в Україні не є значним джерелом впливу на навколишнє середовище у порівнянні з іншими видами промисловості. Проте глобальне потепління і зміна клімату впливають на неї в сукупності з аграрним сектором ледь не більше всього, що призводить до значних збитків. Виробники вимушені активно реагувати на це. Отже розроблення стратегії адаптації харчової промисловості до зміни клімату є недохідним завданням для України. Однак така стратегія досі ще не була розроблена.

Новизна. Розроблено Стратегію адаптації харчової промисловості України до зміни клімату. Використано комплексний науково обґрунтований підхід, завдяки якому охоплено різні напрями для адаптації харчової промисловості – від оптимізації нормативно-правового забезпечення до диверсифікації рослинної сировини за рахунок використання дикорослих рослин регіональної флори.

Методологічне або загальнонаукове значення. Отримані результати є міждисциплінарними та відрізняються можливістю їх використання як основи для розробки аналогічних стратегій для різних галузей промисловості. Вони відповідають сучасним методологічним підходам і окреслюють коло як спеціальних, і загальнонаукових актуальних питань. Розроблена стратегія сформульована у відповідності з науковими принципами об'єктивності та практико-орієнтованості, що забезпечує ефективність передбачених нею цілей та завдань.

Виклад основного матеріалу. На першому етапі дослідження проведена оцінка ризику на основі «Methodology for drafting Climate Change Adaptation Strategies» [9]. Оскільки серед галузей в матриці цього документу немає харчової промисловості, нами була модифікована методика та розроблена матриця аналізу ризиків для харчової промисловості і її підгалузей за факторами кліматичного впливу на основі репрезентативних індексів співставлення з сільськогосподарським, рибним господарством тощо. Оцінювали ймовірність впливу фактору кліматичного впливу на харчову промисловість та загрозу наслідків впливу. Об'єднавши ймовірність

та загрозу отримали матрицю ризику для харчової промисловості, на основі якої нами була розроблена «Стратегія адаптації харчової промисловості України до зміни клімату» з урахуванням сучасних тенденцій:

СТРАТЕГІЯ

адаптації до зміни клімату харчової промисловості України до 2040 року

Загальна частина

Зміна клімату обумовлена рядом різних факторів, частково природного походження, але в першу чергу є результатом глобальної антропогенної діяльності в важкій, агро-, харчовій, матеріалообробній, енергетичній промисловості тощо.

Вона є глобальною тенденцією, але вплив зміни клімату не рівномірний. Наприклад, на території Європи підвищення температури на 0,5 °C менше у західній частині порівняно зі східною. Тенденція більшого впливу на схід і меншого на захід спостерігається також в Україні.

Не дивлячись на збільшення середньорічної температури впродовж півстоліття всього на 1–1,3 градуса в середньому, цього цілком достатньо для появи негативних наслідків у вигляді збільшення частоти пожеж, підтоплень, посух, зміни частоти опадів, аномальної спеки.

Цілі стратегії та завдання до них

Цілі стратегії наступні:

Перша ціль – Посилення адаптаційних спроможностей шляхом покращення нормативно-правового забезпечення в сфері харчової промисловості.

Завдання: 1. Створення спеціального органу або виконання функції координаційно-дорадчого органу, що займається конкретно питаннями адаптації харчової промисловості до зміни клімату; 2. Законодавчо забезпечити принципи оптимального використання ресурсів та ведення виробництва у харчовому секторі. Для цього інтегрувати проведення моніторингу на всіх етапах виробництва та транспортування, ефективного управління ресурсами та оновлення обладнання. Інтегрувати проведення оцінки кліматичних ризиків для попередження та адаптації до них.

Друга ціль – Оптимізація виробничих процесів для зменшення викидів та впливу харчового сектору на зміну клімату.

Завдання: 1. Збільшити частку відновлюваних джерел енергії; 2. Залучення в процес виробництва невикористаної сировини та відходів; 3. Оптимізація логістики і зміна циклів використання готової продукції для зменшення виробничих втрат.

Третя ціль – Підвищення обізнаності та рівня знань працівників харчових виробництв.

Завдання: Змінення, введення та оновлення освітніх програм і заходів направлених підвищення обізнаності та кваліфікації у сфері дотримання і розробки адаптаційних заходів для харчової промисловості.

Четверта ціль – Покращення науково-методичного забезпечення відповідного сектору.

Завдання: Аналіз всіх наявних світових технологій та методик, доцільності їх використання та перспективності подальшого розвитку і використання на рівні малих, середніх та великих підприємств харчової промисловості; збільшення доступності цих технологій, а також методик для їх використання, підготувати практичні кластери для харчового сектору.

П'ята ціль – Рекомендація або розробка і проведення заходів, які потенційно можуть допомогти в адаптації харчової промисловості до змін клімату на рівні окремих підприємств, а також територіальних громад.

Завдання: 1. Надання фінансування на проведення заходів, закупку та інтеграцію обладнання для покращення адаптації підприємств до зміни клімату, а також надання кредитів та страхування у відповідній сфері; 2. Стимулювання дослідження та впровадження ефективних з точки зору адаптації до зміни клімату технологій таких як: IoT-сенсори температури, якості та вологості; технологія упаковки Smart packing; технології білків з CO₂, наприклад, Solein; введення вертикального або закритого виробництва за прикладом СЕА; сонячні холодильні установки; підземні сховища; технологія криогенного охолодження; 3. Боротьба з неефективним плануванням шляхом покращення зворотного зв'язку і підзвітності та підвищення відповідальності на різних виробничих ланках.

Головні заходи адаптації з реалізації стратегії

Для адаптації до змін клімату харчової промисловості необхідні наступні заходи:

1. Проведення диверсифікації постачальників сировини. В цьому напрямку можна запропонувати наступні рекомендації:

збільшити рівень диверсифікації на базі внутрішніх виробників, оскільки залучення іноземних постачальників переважає при значному внутрішньому ресурсному потенціалі, до того ж більше використання сировини від своїх постачальників також збільшить надходження в бюджет;

збільшити диверсифікацію сировини з інших країн для деяких товарів з низькою диверсифікацією таких як какао, кава, харчові добавки та спеції; субсидіювати власне виробництво ферментів, ароматизаторів, конкретних консервантів, а також функціональних харчових добавок для росту рентабельності внутрішнього виробництва.

2. Загальна диверсифікація сировини. Необхідно залучати потенційно можливу місцеву рослинну сировину, дикорослі та нетрадиційні рослини, які мало або рідко використовуються в харчовій промисловості. Значна частина такої сировини придатна до застосування і її використання може зменшити логістичні ризики, вплив на навколишнє середовище та забезпечити стабільність виробництва.

Таблиця 1

Методи, технічні і оптимізаційні рішення для харчових виробництв, які направлені на адаптацію та пом'якшення впливу до зміни клімату у рамках адаптаційної стратегії

Напрямок	Метод або рішення	Навіщо впроваджується метод або рішення	Знижує кліматичні ризики
Водокористування	Рециркуляція та повторне використання води	Очищення з повторним використанням технічної води для мийки та охолодження	Посухи та водного дефіциту
	Використання водозберігаючого обладнання	Проведення форсунок низького тиску та СІР-системи з оптимізованими циклами	Зростання вартості та нестачі води
	Проведення збору дощової води	Використання атмосферних опадів для технічних потреб виробництв	Випадіння нерівномірних опадів
Енергоефективність	Модернізація обладнання компаній	Введення систем моніторингу та керування енергоспоживанням	Зайвих енерговитрат та перегріву
	Теплоутилізація	Встановлення енергоефективних печей, компресорів, холодильних установок	Зростання температур та цін на енергію
	Автоматизація енергоспоживання промисловості	Використання відпрацьованого тепла за допомогою пастеризації і сушки	Ріст пікових навантажень
Клімат-контроль	Сучасні системи вентиляції та охолодження	Ведення контролю температури й вологості у виробничих зонах	Випромінювання теплових хвиль
	Холодильне обладнання з природними холодоагентами	З аміаком замість фреонів	Високі температури і викиди парникових газів
Проведення відновлюваної енергетики	Сонячні електростанції та біопаливо	Створення власного виробництва енергії з відходів і ВДЕ компанією	Перманентна енергетична нестабільність
Проведення організаційних рішень	Проведення навчань персоналу	Підготовка до роботи в умовах спеки та аварій	Утворення екстремальних погодних явищ
	Кліматичні плани адаптації	Включення кліматичних ризиків у стратегію підприємства	Зміни клімату у довгостроковій перспективі
Логістика та зберігання	Локалізація постачання необхідних компонентів та сировини	Скорочення транспортних відстаней	Періодичні погодні екстремуми
	Оптимізація холодових ланцюгів	Зменшення втрат при транспортуванні та зберіганні	Постійне підвищення середньорічних температур
Цифровізація	Smart-сенсори	Ведення контролю температури, вологості, споживання ресурсів	Перегрівання та втрати
	Прогнозування можливих ризиків	Використання кліматичних і виробничих моделей	Невизначеність щодо кліматичної ситуації
Сектор сировинної безпеки	Диверсифікація постачальників сировини	Закупівля сировини з різних кліматичних зон	Неврожаї та кліматичні шоки
	Створення стратегічних запасів	Оптимізація складування з урахуванням термінів зберігання	Перебої постачання сировини
	Перехід на більш стійку сировину	Використання різних сортів і сировини, стійких до спеки та посух	Проблема зміни агроклімату
Відходи та побічні продукти	Ведення переробки органічних відходів	Залучення технологій біогазу та компостування	Поява ресурсної нестачі та викидів

3. Підвищення енергетичної стійкості харчових підприємств. Через високу енергетичну нестабільність в умовах воєнного стану ця проблема стає однією з найактуальніших, оскільки у 2024 році Україна втратила більш ніж 9 ГВт електрогенераційних потужностей, тобто цей показник в два рази скоротився, відповідно скорочуються прибутки та адаптаційні можливості. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є використання біогазових установок в місцях видалення відходів. Іншим джерелом енергії можуть бути сонячні панелі та станції, проте вони мають меншу ефективність електрогенерації.

4. Використання вторинної сировини. При переробці первинної сировини утворюється від 10 до 35 % вторинної, але лише 30–50 % з неї використовують повторно на даний момент. Наприклад, фруктові залишки містять антиоксиданти, поліфеноли та пектини і можуть бути використані в джемах, желе тощо.

5. Проведення аудитів, спрямованих на оптимізацію організаційної складової виробництва харчової продукції за умов зміни клімату.

6. Аналіз ризиків: впливу харчової промисловості на навколишнє середовище; логістичних ризиків втрати продукції; при виборі постачальників сировини; кліматичного впливу та режиму опадів, засух, вітрів на виробничі процеси.

Після визначення потенційних ризиків харчової промисловості потрібно вжити необхідні заходи для зменшення загрози, пом'якшення впливу і підвищення адаптації.

Приклади відповідних методів, оптимізаційних та технічних рішень наведено в таблиці 1.

Забезпечення фінансування реалізації заходів

Державний та комунальний бюджет, державні програми підтримки та кредитування, інші не заборонені джерела.

Очікувані результати

1. Покращення законодавства та державної політики в напрямку адаптації до зміни клімату харчової промисловості напряму, чи опосередковано, а також посилення інституцій; 2. Повне забезпечення дотримання та реалізації всіх міжнародних угод, які взялась на себе виконувати Україна, наприклад, Рамкової угоди ООН або Паризької кліматичної угоди; 3. Поліпшення технологій фільтрації

та очищення парникових газів на виробництвах; 4. Посилення повноважень і способів регіональних виконавчих органів та інших установ впроваджувати заходи із адаптації та запобігання змінам клімату для харчових виробництв різних ланок; 5. Покращення освітньої та науково-технічної бази і методології харчових виробників і установ, що сприяють впровадженню заходів із адаптації та запобігання змінам клімату, в першу чергу в харчовій промисловості; 6. Розширення спектру та збільшення обсягів рослинної сировини за рахунок використання місцевих видів флори; 7. Підвищення рівня контролю та оцінки ризиків зміни клімату для якісної і передчасної реакції установ і підприємств.

Головні висновки. Виділені адаптаційні напрями для харчової промисловості: сировинні адаптації; удосконалення технологій та методів циркулярного використання виробничих ресурсів; покращення процедур і принципів пакування; логістичні адаптації; зменшення енергоспоживання та впровадження відновлюваних джерел енергії; впровадження технологій штучного створення біомаси для харчової промисловості, залучення і розвиток технологій отримання прісної води. Проведено аналіз ризиків харчової промисловості щодо зміни клімату. Найбільший ризик на базові процеси виробництва та транспортування в харчовій промисловості на різних етапах має підвищення середньої температури повітря більш ніж на 30 °С, а також ризик посух. Розроблено стратегію адаптації харчової промисловості України до зміни клімату, запропоновано відповідні заходи та напрямки розвитку з урахуванням наявних потреб і стану харчової промисловості України.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання харчовими підприємствами України розробленої стратегії може сприяти визначенню чіткого плану, завдань, цілей з адаптації до зміни клімату; партнерській роботі із залучення громадськості та її інформування; аналізу ризикових ситуацій; оцінці ефективності заходів і відповідності цілям розвитку держави; вибору і застосуванню оптимальних рішень при мінімальних витратах; провадженню заходів для вирішення першочергових кліматичних проблем у харчовій промисловості.

Література

1. Severe climate change risks to food security and nutrition / A. Mirzabaev et al. *Climate Risk Management*. 2023. Vol 39. 100473. doi: 10.1016/j.crm.2022.100473
2. Wijerathna-Yapa A., Pathirana R. Sustainable Agro-Food Systems for Addressing Climate Change and Food Security. *Agriculture*. 2022. Vol. 12. 1554. doi: 10.3390/agriculture12101554
3. Reducing risks to food security from climate change / B. M. Campbell et al. *Global Food Security*. 2016. Vol. 11. P. 34–43. doi: 10.1016/j.gfs.2016.06.002
4. Impacts of climate change on food system security and sustainability in Bangladesh / M. M. Rahman. *Journal of Water and Climate Change*. Vol. 15. No. 5, 2162 doi: 10.2166/wcc.2024.631
5. Okafor C. A., Uhuegbu C. C. Climate change and food security: Adaptation strategies and funding supports. *International Journal of Science and Research Archive*. 2024. Vol. 13. Iss. 02. P. 3030–3039. doi: 10.30574/ijrsra.2024.13.2.2504

6. Food Security in a Changing Climate: Adaptation and Mitigation Approaches / O. G. Ndubuisi et al. *International Journal of Innovative Biosciences Research*. 2025. Vol. 13. No. 3. P. 39–50. doi:10.5281/zenodo.16937131
7. Climate Change and Plant Foods: The Influence of Environmental Stressors on Plant Metabolites and Future Food Sources / I. Šola et al. *Foods*. 2025. Vol. 14, 416. doi: 10.3390/foods14030416
8. Ziervogel G., Ericksen P. J. Adapting to climate change to sustain food security. *WIREs Climate Change*. 2010. Vol. 1. Iss. 4. P. 525–540. doi: 10.1002/wcc.56
9. Strengthening the capacity of regional and local administrations for implementation and enforcement of EU environmental and climate change legislation and development of infrastructure projects EuropeAid/140209/DH/SER/UA, 11 Feb 2022. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2022/08/Methodology_for_drafting_Climate_Change_Adaptation_Strategies_Plans_v2_ENG.pdf (дата звернення: 24.02.2026).

Дата першого надходження статті до видання: 26.06.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА СУМУ АКТИВНИХ ТЕМПЕРАТУР ДО ДАТИ ОСТАННЬОГО ВЕСНЯНОГО ЗАМОРОЗКУ В МІСТАХ УКРАЇНИ

Коваленко Ю.Л., Дмитренко Т.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків
yurii.kovalenko@kname.edu.ua, tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua

Статтю присвячено аналізу трансформацій термічного режиму атмосфери України в умовах глобального енергетичного дисбалансу Землі, який за останні два десятиліття більш ніж подвоївся і досяг рекордного рівня у 2023 році. Обґрунтовано доцільність застосування кліматичного індикатора – суми активних температур (понад 10 °C), накопиченої від початку року до дати останнього весняного заморозку. Показник дає змогу оцінити ризики «фальшивої весни» (false spring) – передчасної фізіологічної вегетації рослин та їхньої деструкції хвилями похолодань. На основі аналізу метеоспостережень (1950–2025 рр.) виявлено регіональну диференціацію кліматичних трендів для міст, що репрезентують різні фізико-географічні зони України (Київ, Харків, Одеса). Встановлено, що в Києві та Одесі процеси розвиваються за класичним сценарієм потепління: безморозний період подовжився на 9–12 та 7–9 днів відповідно, а весняні заморозки відступають на раніші терміни. Натомість для Харкова верифіковано небезпечну аномалію: дата припинення весняних заморозків змістилася на 2–3 доби пізніше, що скоротило безморозний період на 6–7 днів. Водночас у всіх регіонах зафіксовано стрімке зростання акумуляції тепла до моменту останнього прояву холоду (найбільш критично у Харкові – з 0 до 75 градусо-днів), що доводить підвищення вразливості агроєкосистем та фітоценозів до криогенного стресу. Охарактеризовано деструктивний вплив гідротермічних зсувів на екосистеми та економіку. Визначено, що передчасна транспірація через механізм «пам'яті» ґрунтової вологи провокує весняне висихання ґрунту й загострення літніх посух у степовій зоні. У лісовому господарстві це зумовлює криогенну дефоліацію, а у фітосанітарному секторі – експансію інвазійних видів на північ. Доведено, що збитки від «фальшивої весни» у плодівництві перевищують втрати від літніх посух. Це актуалізує потребу реформи аграрного страхування (покриття в Україні становить 3–5 % проти 20–30 % у середньому в країнах ЄС) та впровадження систем раннього попередження (Early Warning Systems) в межах Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України до 2030 року. *Ключові слова:* енергетичний дисбаланс, «фальшива весна», сума активних температур, весняні заморозки, безморозний період, агрокліматичні ризики, адаптація до зміни клімату.

Assessing the impact of climate change on the sum of active temperatures before the date of the last spring frost in Ukrainian cities. Kovalenko Yu., Dmytrenko T.

This article analyses changes in the thermal regime of Ukraine's atmosphere in the context of the Earth's global energy imbalance, which has more than doubled over the past two decades and reached a record high in 2023. It also substantiates the feasibility of using a climate indicator, the sum of active temperatures (above 10 °C) accumulated from the beginning of the year to the date of the last spring frost. This indicator allows one to assess the risk of a false spring (or fake spring) – the premature physiological growth of plants and their subsequent destruction by cold waves. Based on an analysis of meteorological observations (1950–2025), regional differences in climate trends were identified for cities across different physiographic zones of Ukraine (Kyiv, Kharkiv, and Odesa). It has been established that in Kyiv and Odesa, processes are developing according to the classic warming scenario: the frost-free period has extended by 9–12 and 7–9 days, respectively, and spring frosts are retreating to an earlier date. A dangerous anomaly has been verified for Kharkiv: the date of the end of spring frosts has shifted by 2–3 days later, shortening the frost-free period by 6–7 days. At the same time, a rapid increase in heat accumulation by the time of the last cold spell has been recorded in all regions, most critically in Kharkiv – from 0 to 75 degree-days – demonstrating the increased vulnerability of agroecosystems and phytocoenoses to cryogenic stress. The destructive impact of hydrothermal shifts on ecosystems and the economy is characterised. It has been determined that premature transpiration, through the “memory” mechanism of soil moisture, triggers spring soil drying and exacerbates summer droughts in the steppe zone. In forestry, this leads to cryogenic defoliation, and in the phytosanitary sector, to the northward expansion of invasive species. It has been proven that the damage from false spring in fruit growing industry exceeds the losses from summer droughts. This highlights the need for agricultural insurance reform (in Ukraine, coverage is 3–5% versus an average 20–30 % in the EU countries) and the implementation of early warning systems (EWSs) within the framework of Ukraine's Strategy for Environmental Security and Adaptation to Climate Change by 2030. *Key words:* energy imbalance, false spring, sum of active temperatures, spring frosts, frost-free period, agroclimatic risks, adaptation to climate change.

Постановка проблеми. Енергетичний дисбаланс Землі за останні два десятиліття більш ніж подвоївся, досягнувши рекордного рівня близько 1,8 Вт/м² у 2023 році (за супутниковими спостереженнями

CERES) [1], що свідчить про накопичення значної кількості надлишкової енергії в океанах та атмосфері. Цей процес безпосередньо впливає на стійкість агроєкосистем, змушуючи наукову спільноту



переглядати традиційні індикатори теплозабезпеченості та вегетаційного потенціалу.

Особливе місце в ієрархії агрокліматичних показників посідає сума активних температур, яка традиційно використовувалася для визначення меж вирощування сільськогосподарських культур. Проте в умовах нестабільного клімату виникає потреба в більш нюансованих критеріях, зокрема в розрахунку цього показника, накопиченого з початку року до дати останнього весняного заморозку [2]. Цей індикатор дозволяє кількісно оцінити ризик так званої «фальшивої весни» – явища, коли раннє накопичення тепла стимулює передчасний фізіологічний розвиток рослин, роблячи їх критично вразливими до наступних хвиль похолодання [3].

Актуальність дослідження. Україна демонструє темпи потепління, що суттєво випереджають середньосвітові показники, а швидкість підвищення середньорічної температури в країні нині є однією з найвищих у Європі [4]. За період з 1991 по 2023 рр. кожне наступне десятиліття перевищувало за температурним режимом попереднє. Так, у 2011–2019 рр. позитивне відхилення середньої температури повітря становило 1,7 °C щодо базової кліматичної норми 1961–1990 рр. [5].

Індикатор «сума активних температур з початку року до дати останніх заморозків» слугує мірою вразливості рослин до весняних термічних шоків. У науковій літературі цей показник часто асоціюється з оцінкою ризику пошкодження плодів бруків та молодих пагонів [2]. Термін «фальшива весна» описує ситуацію, коли аномально теплий початок року стимулює ранній вихід рослин зі стану глибокого спокою та початок накопичення теплових одиниць. Якщо до моменту останнього заморозку рослина встигає накопичити значну суму активних температур, вона переходить у фази високої метаболічної активності (набрякання брунок, цвітіння), за яких критична температура пошкодження тканин істотно підвищується, наближаючись до 0 °C або навіть вище.

Аналіз довгострокових даних (1952–2021 рр.) у континентальній частині США показав, що, попри загальне потепління та раннє настання безморозного періоду, ризик «фальшивої весни» не демонструє однозначного спаду: на низці станцій зафіксовано статистично значуще зростання суми градусо-днів (GDD) до дати останнього заморозку, що вказує на посилення вразливості рослинності у північно-східних регіонах [2].

В Україні ситуація 2024 року стала хрестоматійним прикладом спрацювання цього індикатора. За даними Українського гідрометеорологічного центру, у першій декаді квітня суми ефективних температур вище +5 °C значно перевищували багаторічні норми, досягаючи 125–160 °C·днів у Степу проти норми 35–80 °C·днів. Таке інтенсивне накопичення тепла спровокувало бурхливий розвиток озимих та

плодових культур, після чого майже на всій території країни спостерігалися заморозки інтенсивністю до –4...–8 °C. Саме поєднання дуже раннього накопичення активних температур та «унікально пізніх» заморозків стало причиною катастрофічних втрат урожаю 2024 року [6].

Використання сценаріїв RCP 4.5 та RCP 8.5 дозволяє прогнозувати подальше зростання теплових ресурсів. Очікується, що до середини сторіччя суми активних температур до дати останніх заморозків у південних областях України зростуть ще на 130–180 °C·днів. Це призведе до інтенсифікації фенологічного розвитку рослин, що зробить індикатор суми температур до останнього заморозку ще більш актуальним для оперативного управління агрокліматичними ризиками [7].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження безпосередньо відповідає положенням Паризької кліматичної угоди (зокрема ст. 7 щодо посилення адаптаційної спроможності та зниження вразливості екосистем) [8] та Стратегії ЄС «Від лану до столу» (Farm to Fork Strategy) в межах Європейського зеленого курсу. Оцінка ризиків «фальшивої весни» робить внесок у розвиток систем раннього попередження (Early Warning Systems) для забезпечення продовольчої стабільності, що є однією з ключових Цілей сталого розвитку ООН до 2030 року (Ціль 2 «Подолання голоду» та Ціль 13 «Пом'якшення наслідків зміни клімату»).

Робота слугує прямим виконанням завдань Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату України на період до 2030 року, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р [9]. Дослідження спрямоване на реалізацію таких стратегічних пунктів, як «проведення оцінки вразливості агроєкосистем до зміни клімату» та «моделювання майбутніх змін кліматичних умов для галузей економіки».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На цей час науковцями успішно реалізовано моделювання динаміки температурних показників та оцінено загальну зміну термічного режиму для різних географічних зон України. Проте, попри значний доробок із питань агрокліматичного районування та теплозабезпеченості, поза увагою досліджень залишається індикатор суми активних температур, накопиченої саме до дати останнього весняного заморозку, як інтегральна міра ризику «фальшивої весни» в умовах України. Бракує зіставного аналізу динаміки цього показника для міст різних фізико-географічних зон за єдиний тривалий період спостережень (1950–2025 рр.), а також системної оцінки його впливу не лише на рослинництво, а й на суміжні галузі природокористування та компоненти довкілля. Не висвітлено залишається регіональна аномалія, за якої на тлі загального потепління дата останнього заморозку зміщується на пізніші строки

(випадок Харкова). Саме цим невирішеним питанням присвячено запропоновану статтю.

Мета дослідження – аналіз динаміки індикатора «Сума активних температур ($>10^{\circ}\text{C}$) від початку року до дати останнього весняного заморозку» в містах України для подальшого застосування під час розробки заходів з адаптації секторів економіки та компонентів довкілля до глобальних змін клімату.

Новизна. Уперше для трьох опорних міст України (Київ, Харків, Одеса) за уніфікований період 1950–2025 рр. виконано спільний аналіз динаміки трьох пов'язаних характеристик – дати останнього весняного заморозку, тривалості безморозного періоду та суми активних температур ($>10^{\circ}\text{C}$) до дати останнього заморозку. Виявлено та верифіковано регіонально-диференційований характер змін, зокрема небезпечну харківську аномалію (зміщення дати останнього заморозку на пізніші строки за одночасного стрімкого накопичення тепла). Запропоновано розглядати ΣT_a до дати останнього заморозку як операційний індикатор ризику «фальшивої весни» для систем раннього попередження.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає в обґрунтуванні та апробації інтегрального агрокліматичного індикатора, що поєднує терморесурсну (ΣT_a) і фенологічно-ризикову (дата останнього заморозку) складові. Такий підхід дає змогу переходити від статичного районування за сумами температур до динамічної оцінки вразливості агроєкосистем і суміжних секторів. Загальнонаукове значення визначається можливістю інтеграції індикатора в системи раннього попередження, у моделі прогнозування валових зборів та в індексні продукти аграрного страхування.

Викладення основного матеріалу. За результатами узагальнення довгострокових метеорологічних спостережень [10–12] встановлено середні багаторічні характеристики термічного режиму для ключових міст України, що репрезентують різні фізико-географічні зони. Для збирання, накопичення та узагальнення інформації застосовано інструмент Claude Opus 4.8.

1) *м. Київ (лісостепова зона).* Стійкий перехід середньодобової температури повітря через $+10^{\circ}\text{C}$ навесні фіксується в середньому 25–28 квітня. При цьому середня багаторічна дата останнього весняного заморозку в повітрі спостерігається 10–15 квітня, тоді як на поверхні ґрунту небезпечні зниження температури тривають до 5–10 травня. За історичними даними, найпізніший заморозок у повітрі (рис. 1) був зареєстрований 11 травня 2017 р. (інтенсивністю $-1,7^{\circ}\text{C}$). Таким чином, середнє значення ΣT_a до дати останнього заморозку становить $\approx 25\text{--}40^{\circ}\text{C}\cdot\text{дб}$ (рис. 2), що зазвичай відповідає 1–3 добам із середньодобовою температурою понад $+10^{\circ}\text{C}$.

Загальна тривалість безморозного періоду в Києві варіює в межах 180–190 днів (рис. 3).

2) *м. Харків (північно-східний Лісостеп).* У північно-східному Лісостепу стійкий перехід через поріг $+10^{\circ}\text{C}$ відбувається в середньому 10–15 квітня. Останній весняний заморозок у повітрі відзначається 10 травня (рис. 4).

Через більш континентальний клімат та пізніші хвилі похолодань показник ΣT_a до дати останнього заморозку є вищим, ніж у столиці, і в останні роки досяг $80^{\circ}\text{C}\cdot\text{дб}$ (рис. 5).

Загальна тривалість безморозного періоду у місті Харків варіює в межах 186–192 днів (рис. 6).

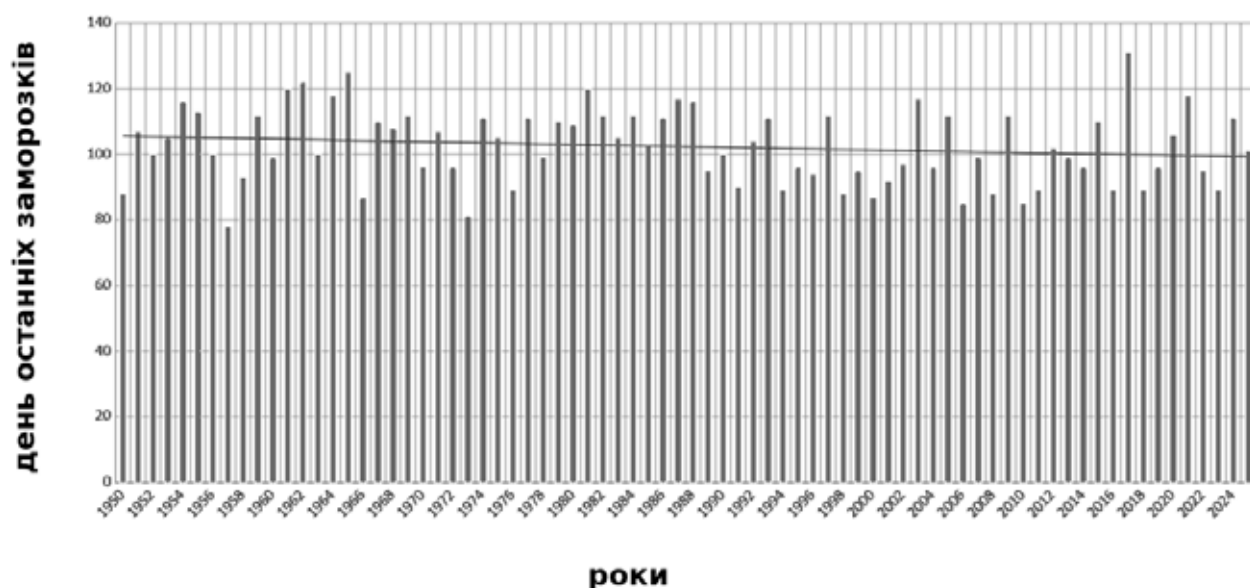


Рис. 1. м. Київ: останній весняний заморозок (день року, DOY), 1950–2025 рр.

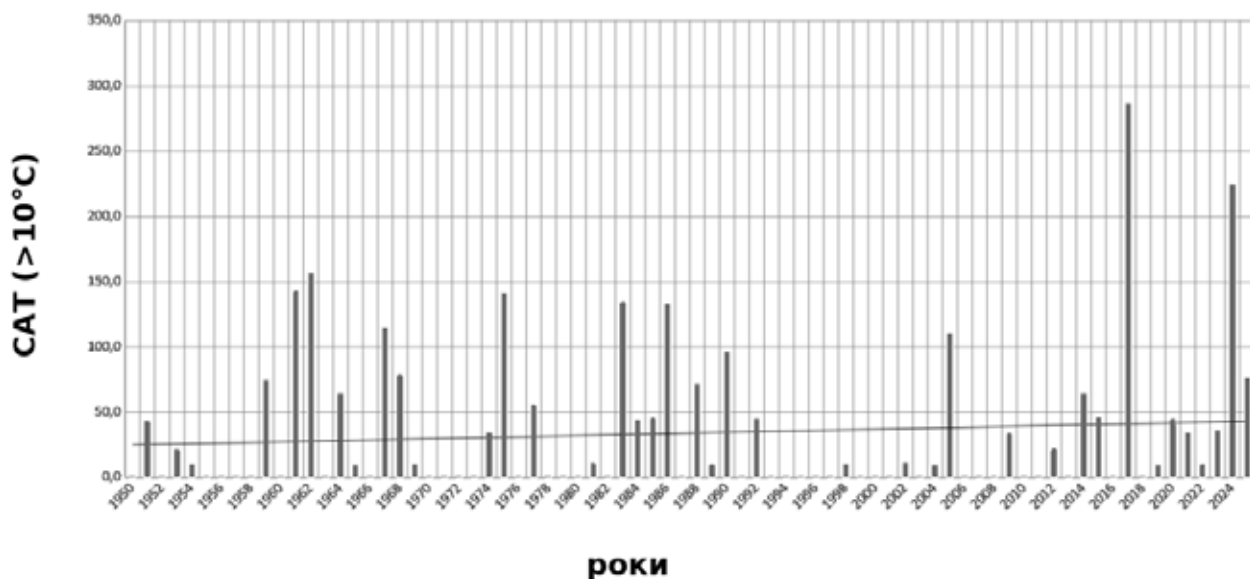


Рис. 2. м. Київ: сума активних температур (>10 °C) до дати останнього заморозку, 1950–2025 рр.

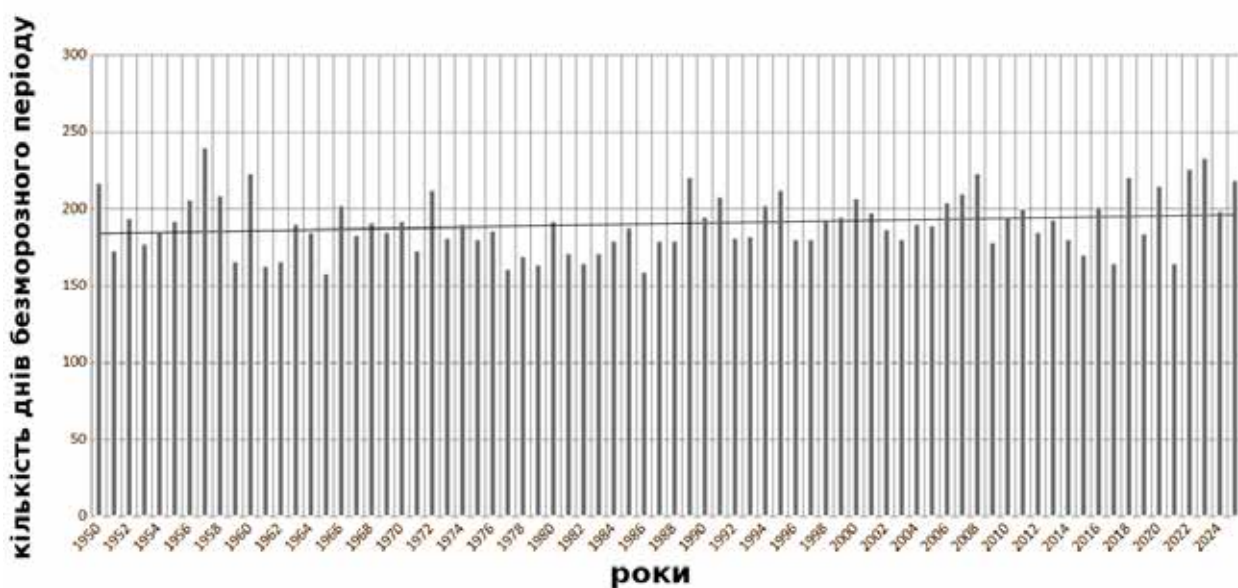


Рис. 3. м. Київ: тривалість безморозного періоду, 1950–2025 рр.

3) м. Одеса (південно-степова зона, причорноморська кліматична підобласть). У причорноморській кліматичній підобласті стійкий перехід через +10 °C настає значно раніше – орієнтовно 14–17 квітня. Середня дата останнього весняного заморозку припадає на 1–5 квітня (рис. 7). Внаслідок цього акумульована сума активних температур ΣT_a до дати останнього заморозку становить 35 °C·дів (рис. 8). В окремі роки цей індикатор набуває нульових значень, якщо заморозок фіксується задовго до стійкого весняного потепління. Безморозний період у регіоні є найтривалішим і становить 210–220 днів (рис. 9).

Проаналізуємо галузі національного господарства, операційна стійкість яких знижується на тлі збільшення показника ΣT_a до дати припинення весняних заморозків.

Рослинництво та зернове господарство. Передчасна акумуляція тепла стимулює занадто ранній старт вегетації озимих і ранніх ярих культур. У разі настання весняного заморозку після проходження рослинами критичних фенофаз (зокрема виходу в трубку, колосіння та цвітіння) спостерігається масове пошкодження або повна загибель генеративних пагонів [13, 14].

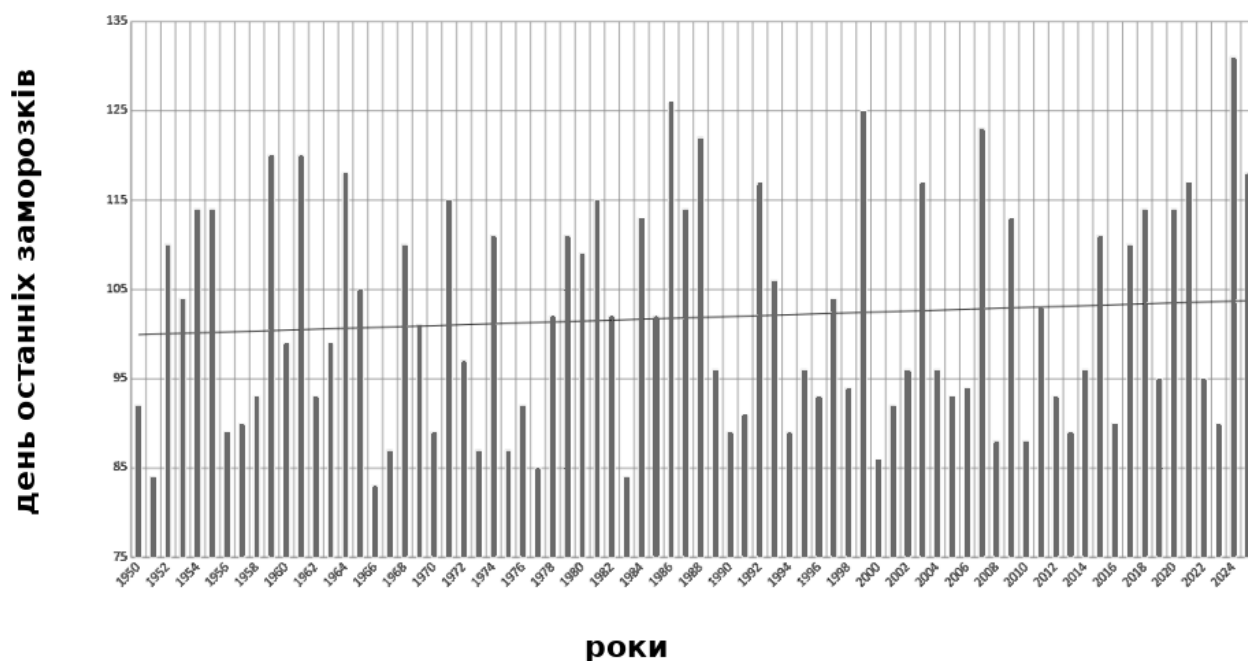


Рис. 4. м. Харків: дата останніх весняних заморозків, 1950–2025 рр.

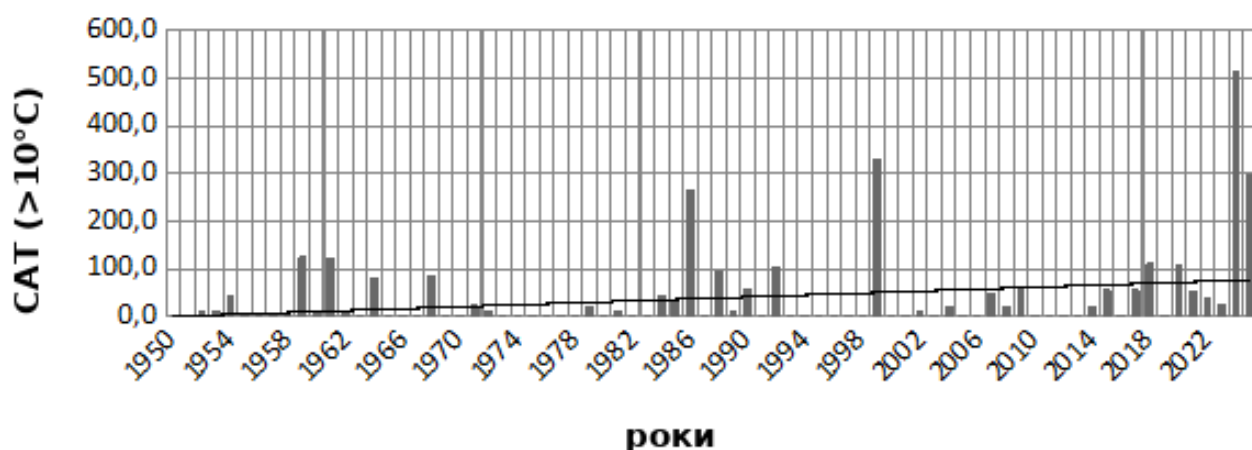


Рис. 5. м. Харків: сума активних температур (>10 °C) до дати останнього заморозку, 1950–2025 рр.

Плодівництво та виноградарство. Цей сектор зазнає найбільших прямих економічних втрат від проявів «фальшивої весни». Зокрема, пізні весняні заморозки у квітні-травні 2017 року в Європі завдали збитків на суму 3,3 млрд євро, при цьому страхове покриття становило лише 18 %. Аналогічні погодні аномалії 2021 та 2024 років в Італії, Франції, Молдові та Україні призвели до втрати від 30 до 80 % урожаю кісточкових культур, яблуні та винограду [15].

Овочівництво відкритого ґрунту. Раннє висаджування розсади теплолюбних культур (томатів, перцю, баклажанів) під дією високих значень ΣТа у квітні призводить до масової загибелі рослин у разі повернення весняних заморозків.

Страхова галузь та фінансовий сектор. Зростання показника ΣТа до дати останнього весняного похолодання перетворює заморозки з категорії рідкісних стихійних лих на категорію системного ризику. Дослідження, проведені в Штирії (Австрія), продемонстрували, що збитки від заморозків у виноградарстві та яблуневих садах формують основну частину аграрного страхового портфеля, а частота виплати страхових відшкодувань стрімко зростає [16]. У США сукупні фінансові втрати від зимових морозів, весняних заморозків та граду в секторі плодівництва сягають близько 400 млн доларів щорічно [17].

Збитки від «фальшивої весни» часто перевищують втрати від літніх посух. Це зумовлено тим, що

кількість днів безморозного періоду

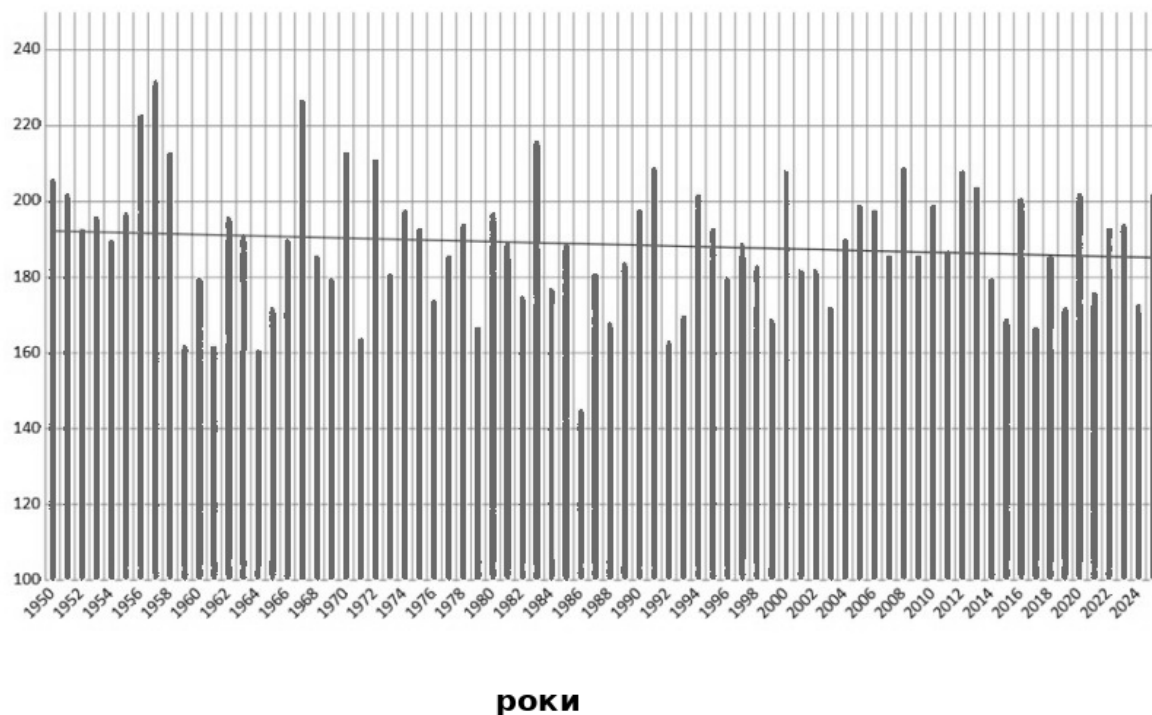


Рис. 6. м. Харків: тривалість безморозного періоду, 1950–2025 рр.

день останніх заморозків

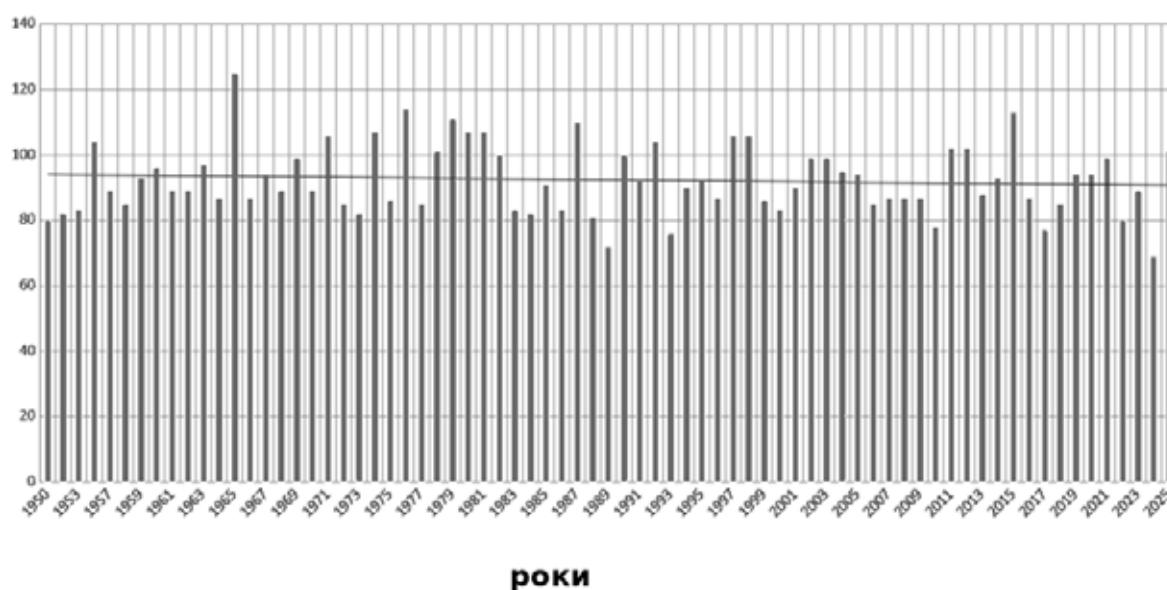


Рис. 7. м. Одеса: останній весняний заморозок (день року, DOY), 1950–2025 рр.

вони відбуваються на стадії, коли основні сезонні витрати на виробництво вже здійснені, а потенційний урожай знищується всього за одну-дві ночі екстремального зниження температури. В Європейському Союзі щорічні втрати сільськогосподарства від кліматичних ризиків оцінюють у 28,3 млрд євро, що становить близько 6 % вартості всієї аграрної продукції [18].

В Україні рівень фінансового захисту аграріїв є досить низьким: лише 3–5 % сільськогосподарських угідь у країні застраховані, тоді як у країнах ЄС частка застрахованих кліматичних втрат у середньому становить 20–30 %, а в окремих країнах із розвиненими субсидованими системами сягає 30–50 % [19].

Лісове господарство. Передчасне розпускання бруньок бука, дуба та ясеня у поєднанні з весня-

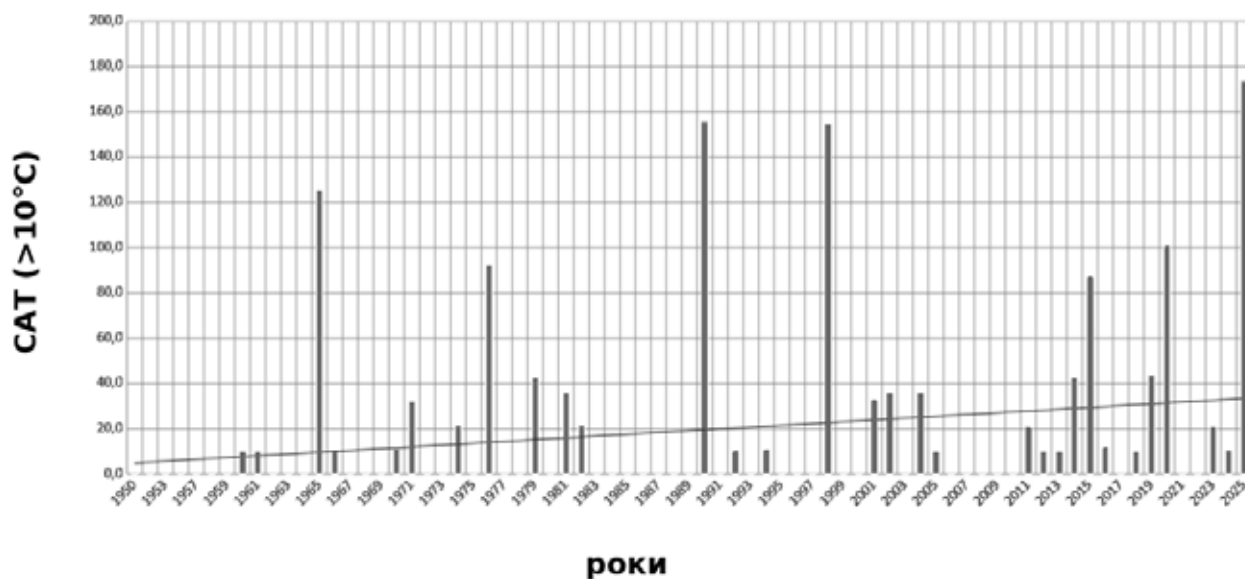


Рис. 8. м. Одеса: сума активних температур (>10 °C) до дати останнього заморозку, 1950–2025 рр.

ними заморозками спричиняє масову дефоліацію (скидання пошкодженого листа), сповільнення приросту деревини, а також суттєве зниження фотосинтетичної продуктивності лісових насаджень [20]. Пошкодження молодих листків весняними заморозками не лише знижує приріст біомаси на 7–14 %, а й суттєво зменшує здатність лісових екосистем до абсорбції вуглекислого газу, формуючи позитивний зворотний зв'язок у процесах глобального потепління [21].

Енергетика. Ранній теплий старт сезону та акумуляція тепла знижують попит на опалення у квітні, проте зумовлюють зростання піків електроспоживання для забезпечення роботи іригаційних систем, холодильного обладнання та промислових кліматичних систем. Одночасно суттєво зростає ймовірність аварійних ситуацій в енергомережі через раптове повернення заморозків, що призводить до замерзання елементів уже розконсервованої технологічної інфраструктури.

Туризм і рекреація. Ранній старт сезону загалом позитивно впливає на розвиток весняного туризму, проте заморозки після початку бутонізації паркових культур суттєво знижують естетичну цінність міських зелених зон та завдають шкоди декоративним насадженням.

Транспорт та інфраструктура. Внаслідок температурних коливань цикли замерзання-відтавання дорожнього полотна стають частішими. Це суттєво прискорює руйнування асфальтобетонного покриття та деструкцію мостових конструкцій [22].

Далі проаналізовано компоненти довкілля, вразливі до зростання ΣT_a до дати останнього заморозку.

Наземні екосистеми та біорізноманіття. Передчасний старт вегетації під дією теплових

аномалій призводить до фенологічних зсувів різної швидкості на різних трофічних рівнях (рослинність – безхребетні – птахи) [23]. Зокрема, дослідники зафіксували зростання асинхронії між термінами прильоту перелітних птахів і початком «зеленої хвилі» (розпускання листя) зі швидкістю понад 0,5 доби/рік. За реконструкцією за 124 роки спостережень виявлено зростання річної ймовірності пошкодження листя весняними заморозками з 0,03 (1889–1979 рр.) до 0,21 (1980–2012 рр.) [24].

Ґрунти та водний баланс. Рання активація транспірації призводить до випереджального та глибшого осушення ґрунтового профілю. Раннє весняне озеленення посилює літню посуху внаслідок міжсезонної «пам'яті» ґрунтової вологи. Для степової зони України це зумовлює суттєве загострення посушливості вже у червні-липні [25]. Збільшення суми активних температур у березні та квітні радикально змінює водний баланс територій, оскільки висока температура стимулює інтенсивне випаровування вологи з ґрунту. Ефект «весняного висихання» ґрунтів, навіть у регіонах, де річна кількість опадів зростає, є прямим наслідком вищого термічного накопичення в ранній період.

Фітосанітарний стан. Збільшення суми градусо-днів (GDD) суттєво прискорює розвиток шкідників. Зокрема, перший літ шкідливої черепашки відбувається на 2 тижні раніше за умови підвищення січнево-лютневої температури повітря всього на 1 °C. Загальне потепління збільшує кількість поколінь шкідників за сезон та сприяє розширенню їхнього ареалу у північному напрямку [26]. Рослини, ослаблені заморозками після періоду активного росту, стають більш сприйнятливими до вторинних інфекцій, а дерева, що втратили першу генерацію

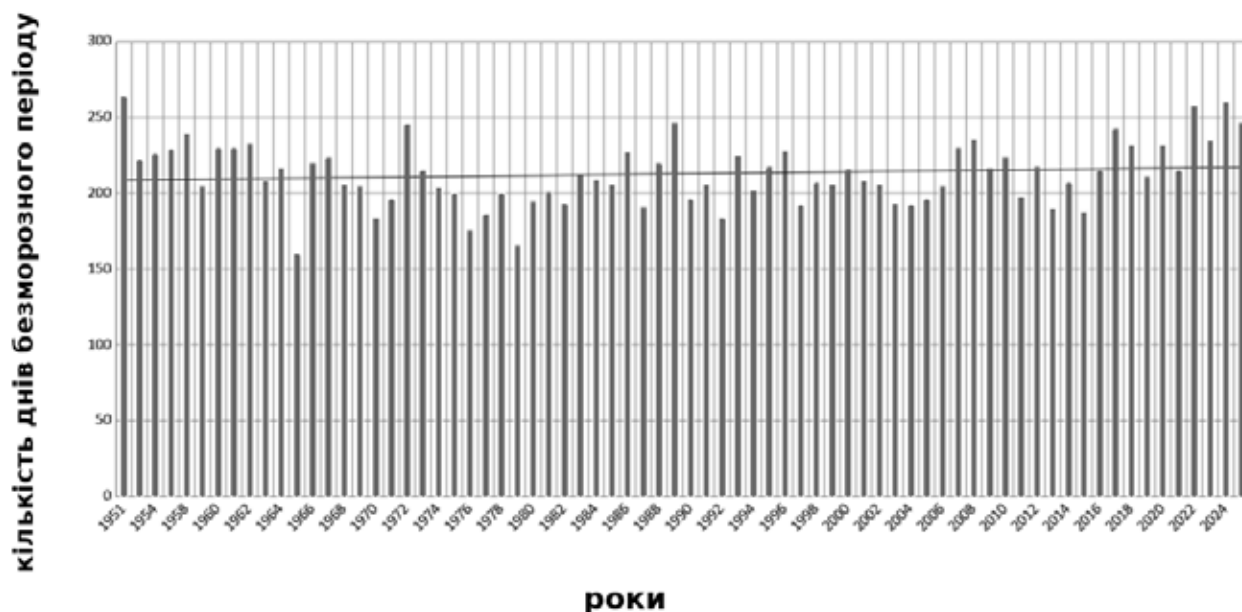


Рис. 9. м. Одеса: тривалість безморозного періоду (днів), 1950–2025 рр.

листя, змушені витратити резервні вуглеводи на вторинне відновлення крони, що знижує їхній імунітет та робить вразливими до заселення короїдами й іншими стовбуровими шкідниками.

Гідрологічний режим. Ранній старт вегетації супроводжується інтенсифікацією евапотранспірації, зниженням обсягів весняного стоку, падінням рівнів водойм та зростанням температури поверхневих вод. Це створює сприятливі умови для «цвітіння» води, прискорення процесів евтрофікації та погіршення якості питної води [27].

Лісові пожежі. Ранній дефіцит ґрунтової вологи у поєднанні з дефоліацією насаджень внаслідок весняних заморозків створює умови підвищеної пожежної небезпеки вже у травні-червні.

Інвазійні види. Сприятливі термічні умови ранньої весни полегшують експансію теплолюбних інвазійних видів рослин (зокрема амброзії полинолистій та борщівника Сосновського) і комах (таких як південноамериканська томатна міль та коричневий мармуровий клоп) у зони Лісостепу та Полісся. Зростання сум ефективних температур дозволяє теплолюбним інвазійним видам активно просуватися далі на північ.

Аналіз даних за останні чотири десятиліття вказує на те, що хоча загальна кількість хвиль холоду в Україні зменшується, частота короткочасних, але різких весняних похолодань у лісостеповій зоні має тенденцію до зростання. Це становить новий суттєвий виклик для ключових секторів економіки та вразливих компонентів довкілля [28]. Моніторинг накопичення градусо-днів у поєднанні з імовірнісним прогнозуванням пізніх весняних заморозків має стати основою для прийняття ефективних управлінських рішень у природоохоронній сфері.

Внаслідок глобальної зміни клімату тривалість безморозного періоду за останні 75 років у середньому збільшилася в Києві на 9–12 діб, в Одесі – на 7–9 діб, а у Харкові вона зменшилася на 6–7 діб. Водночас за цей же 75-річний період дати припинення останніх весняних заморозків у середньому змістилися на 5–6 діб раніше в Києві та на 3–4 доби раніше в Одесі, тоді як у Харкові вони, навпаки, змістилися на 2–3 доби пізніше. За період 1950–2025 рр. сума активних температур ($>10^{\circ}\text{C}$) від початку року до дати останнього весняного заморозку, у середньому збільшилася: у Києві – з 25 до 40 градусо-днів, в Одесі – з 5 до 35 градусо-днів, а в Харкові – з 0 до 75 градусо-днів.

Для Харкова спостерігається унікальна та небезпечна тенденція: попри загальне глобальне потепління, дата останнього весняного заморозку тут зміщується на пізніші терміни (на 2–3 доби). У поєднанні зі стрімким накопиченням тепла у квітні це створює умови для значних агрокліматичних втрат. Така аномалія призвела до скорочення загальної тривалості безморозного періоду в регіоні на 6–7 діб внаслідок затяжної весни. Водночас у Києві та Одесі ситуація розвивається за класичним сценарієм потепління: безморозний період суттєво подовжується (на 9–12 та 7–9 діб відповідно), а весняні заморозки припиняються раніше. Проте зростання суми активних температур до моменту останнього прояву холоду в усіх досліджуваних регіонах підтверджує загальне посилення ризику «фальшивої весни».

Головні висновки. Проведений аналіз динаміки ΣT_a до дати останнього весняного заморозку в містах України дозволяють зробити такі висновки:

1. Глобальний енергетичний дисбаланс, що досяг рекордного рівня у 2023 році, є фундаментальним драйвером зростання частоти «фальшивих весен». Це проявляється через екстремально інтенсивне накопичення тепла у березні-квітні, яке провокує передчасну й деструктивну вегетацію рослин.

2. Найбільш загрозливі тенденції спостерігаються у Харкові, де тривалість весняних хвиль холодів зберігається на тлі загального потепління. У Києві та Одесі агрокліматичний ризик зростає через випереджальні темпи накопичення тепла порівняно зі швидкістю остаточного відступу заморозків.

3. Низький рівень страхового покриття в Україні (лише 3–5 %) робить аграрний сектор критично незахищеним перед кліматичними шоками. Прямі збитки від весняних термічних аномалій у плодівництві та рослинництві починають випереджати фінансові втрати від літніх посух.

4. Отримані результати підтверджують гостру потребу впровадження систем раннього попередження (Early Warning Systems) на основі індикатора

ΣТа до дати останнього заморозку, а також невідкладного переходу на кліматично оптимізовані технології господарювання.

Перспективи використання результатів дослідження. Практичний потенціал впровадження отриманих результатів охоплює кілька рівнів управління аграрним сектором: сформовані прогностичні моделі є ефективним інструментом для модернізації довгострокових стратегій районування сільськогосподарських культур та підвищення точності національних прогнозів валового збору врожаю; інтеграція розробленого індикатора дає змогу оптимізувати календарні строки сівби, обґрунтовано підбирати адаптивні сорти й гібриди, а також впроваджувати превентивні заходи захисту посівів і насаджень від екстремальних температурних коливань; кількісні параметри теплонакопичення та заморозків слугують базою для розробки об'єктивних індексних продуктів страхування, що мінімізує фінансові ризики виробників від весняних холодів стресів.

Література

1. Mauritsen T., Tsushima Y., Meyssignac B. et al. Earth's Energy Imbalance More Than Doubled in Recent Decades. *AGU Advances*. 2025. Vol. 6 (3). e2024AV001636. DOI: 10.1029/2024AV001636.
2. Davis B. A. S. et al. Growing Degree-Day Trends Associated With 'False Springs' in the Continental United States. *International Journal of Climatology*. 2025. DOI: 10.1002/joc.70355.
3. Sgubin G., Swingedouw D., Dayon G., García de Cortázar-Atauri I. et al. The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2018. Vol. 250–251. P. 226–242. DOI: 10.1016/j.agrformet.2017.12.253.
4. Prokopenko K. Agricultural development under a changing climate in Ukraine: trends and challenges. *INCE*. 2023. DOI: 10.36004/nier.cecg.II.2023.17.8.
5. Litvinov D., Litvinova O., Borys N., Butenko A., Masyk I., Onychko V., Khomenko L., Terokhina N., Kharchenko S. The Typicality of Hydrothermal Conditions of the Forest Steppe and Their Influence on the Productivity of Crops. *Journal of Environmental Research, Engineering and Management*. 2020. Vol. 76, No. 3. P. 84–95. DOI: 10.5755/j01.erem.76.3.25365.
6. Український гідрометеорологічний центр. Агromетеорологічні умови першої декади квітня 2025 року: Офіційний бюлетень. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/crop/1547535> (дата звернення: 22.05.2026).
7. Kouzмова K., Іліна A. A., Polevoy A. N. Features of the temperature regime effect on the duration of the crops vegetation period in Southern Ukraine. *Agricultural Sciences*. 2021. Vol. 13, Issue 31. DOI: 10.22620/agrisci.2021.31.001.
8. Паризька угода від 12.12.2015 (ратифікована Законом України № 1469-VIII від 14.07.2016). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161 (дата звернення: 01.06.2026).
9. Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2021 р. № 1363-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-p> (дата звернення: 01.06.2026).
10. Адаменко Т. І., Кульбіда М. І., Прокопенко А. Л. Атлас «Агрокліматичні ресурси України». Київ: ТОВ «Українська картографічна група», 2016. 90 с.
11. Copernicus Climate Change Service (2025): ERA5 hourly time-series data on single levels from 1940 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*.
 1. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels-timeseries>
12. Menne, Matthew J., Imke Durre, Bryant Korzeniewski, Shelley McNeill, Kristy Thomas, Xungang Yin, Steven Anthony, Ron Ray, Russell S. Vose, Byron E. Gleason, and Tamara G. Houston. Global Historical Climatology Network – Daily (GHCN-Daily), Version 3. *NOAA National Climatic Data Center*. 2012.
2. URL: <https://www.ncei.noaa.gov/metadata/geoportal/rest/metadata/item/gov.noaa.ncdc:C00861/html#>
13. Адаменко Т. І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату / Т. І. Адаменко; заг. ред. А. М. Цветкова. Київ: ТОВ «РІА» БЛПЦ, 2014. 16 с.
14. Прокопенко К. О., Удова Л. О. Сільське господарство України: виклики і шляхи розвитку в умовах зміни клімату. *Економіка і прогнозування*. 2017. № 1. С. 92–107. DOI: <https://doi.org/10.15407/eip2017.01.092>
15. Munich Re. Spring frost losses and climate change – Not a contradiction in terms. *Topics Geo Natural Disaster Report*. Munich, 2018. URL: <https://www.munichre.com/en/insights/natural-disaster-and-climate-change/spring-frost-losses-climate-change-2018.html>.
16. Prettenhaler F., Albrecher H., Asamer-Handler M. et al. Climate risk management with insurance or tax-exempted provisions? An empirical case study of hail and frost risk for wine and apple production in Styria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2022. Vol. 80. 103223. DOI: 10.1016/j.ijdr.2022.103223.

17. Cao H., Grant J., Zhang K. Climatic Damage Cause Variations of Agricultural Insurance Loss for the Pacific Northwest Region of the United States. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, No. 12. 2214. DOI: 10.3390/agriculture13122214.
18. European Investment Bank. European agriculture faces growing climate risks that EU can help counter: new study. 2025. URL: <https://www.eib.org/en/press/all/2025-214-european-agriculture-faces-growing-climate-risks-that-eu-can-help-counter-new-study-finds>.
19. Sirenko N., Melnyk O., Bilichenko O., Mikulyak K. Development of the agricultural business insurance system in Ukraine. *Ekonomika APK*. 2025. Vol. 32(4). P. 81–94. DOI: 10.32317/ekon.apk/4.2025.81.
20. Zohner C. M., Mo L., Renner S. S. et al. Late-spring frost risk between 1959 and 2017 decreased in North America but increased in Europe and Asia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2020. Vol. 117, No. 22. P. 12192–12200. DOI: 10.1073/pnas.1920816117.
21. Wang J., Hua H., Guo J. et al. Late spring frost delays tree spring phenology by reducing photosynthetic productivity. *Nature Climate Change*. 2025. Vol. 15. P. 201–209. DOI: 10.1038/s41558-024-02205-w.
22. Ukraine's Climate Change Adaptation Communication to UNFCCC. Kyiv, 2024. 35 p. URL: <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%201st%20Adaptation%20Communication.pdf>.
23. Mayor S. J., Guralnick R. P., Tingley M. W. et al. Increasing phenological asynchrony between spring green-up and arrival of migratory birds. *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Art. 1902. DOI: 10.1038/s41598-017-02045-z.
24. Augspurger C. K. Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology*. 2013. Vol. 94, No. 1. P. 41–50. DOI: 10.1890/12-0200.1.
25. Lian X., Piao S., Li L. Z. X. et al. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. *Science Advances*. 2020. Vol. 6, No. 1. eaax0255. DOI: 10.1126/sciadv.aax0255.
26. Skendžić S., Zovko M., Živković I. P., Lešić V., Lemić D. The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*. 2021. Vol. 12, No. 5. Art. 440. DOI: 10.3390/insects12050440.
27. Coffey R., Paul M., Stamp J., Hamilton A., Johnson T. A Review of Water Quality Responses to Air Temperature and Precipitation Changes 2: Nutrients, Algal Blooms, Sediment, Pathogens. *Journal of the American Water Resources Association*. 2019. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8048137/>.
28. Balabukh V. O., Malyska L. V., Dovgal H. P., Yahodynets S. M., Lavrynenko O. M. Dynamics of frequency and intensity of cold waves in Ukraine under global warming. *Agricultural Science and Practice*. 2025. Vol. 12, No. 3. P. 3–14. DOI: 10.15407/agrisp12.03.003.

Дата першого надходження статті до видання: 13.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ВПЛИВ ЗМІН КЛІМАТУ НА ГЕОЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН І ФУНКЦІОНУВАННЯ РІЧКОВИХ СИСТЕМ ТА ОЗЕР ПОЛІСЬКОГО РЕГІОНУ

Шевченко О.В., Ковальчук І.П., Опенько І.А., Пронь О.С., Тихенко Р.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Васильківська, 17, 03040, м. Київ

shevchenko_ov90@ukr.net, kovalchukip@ukr.net, ivan_openko@ukr.net,

olyapron11@gmail.com, tyhenko@ukr.net

Статтю присвячено науковому обґрунтуванню оцінювання впливу сучасних кліматичних змін на геоекологічний стан і функціонування річкових систем та озер Поліського регіону України. Актуальність дослідження зумовлена тим, що Полісся, яке традиційно розглядалося як територія високої зволоженості, у сучасний період дедалі частіше демонструє ознаки сезонного водного дефіциту, редукції снігового живлення, посилення літньо-осінньої межени, обміління озер, термічного стресу водних екосистем і трансформації торфово-болотних ландшафтів. Мета дослідження полягає у розробленні концептуально-методичного підходу до оцінювання кліматично зумовлених геоекологічних ризиків у річково-басейнових та озерно-басейнових системах Полісся. Методологічну основу дослідження становлять басейновий підхід, ландшафтна лімнологія, гідрохімічна інтерпретація якості води, аналіз довгих гідрометеорологічних рядів. Обґрунтовано, що найінформативнішими для Полісся є не лише середньорічні показники температури й опадів, а передусім сезонні та подієві індикатори: тривалість бездошових періодів, частота зимових відлиг, стабільність снігового покриву, інтенсивність злив, потенційна евапотранспірація, температура води, рівневий режим, кисневий баланс, трофо-сапробіологічні показники і структура ландшафтів водозбору. Наукова новизна полягає у формулюванні концепції клімато-гідроекологічної трансформації природних умов Полісся, за якої водні об'єкти переходять від переважно снігово-повеневого та болотно-регулятивного режиму до режиму, керованого літньо-осіннім дефіцитом вологи, епізодичними паводковими імпульсами та зростанням ролі внутрішнього господарського навантаження на басейнові ландшафти. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованої моделі для моніторингу змін стану водних ресурсів річково-басейнових та озерно-басейнових систем, планування заходів з ренатуралізації боліт, управління функціонуванням малих річкових та озernih басейнів та формування геоінформаційних систем оцінки ризиків природокористування в них. *Ключові слова:* Полісся, зміни клімату, річково-басейнова система, озерно-басейнова система, гідрохімія, якість води, посуха, геоекологічні ризики.

The impact of climate change on the geoeological state and functioning of river systems and lakes of the Polissia region.
Shevchenko O., Kovalchuk I., Openko I., Pron O., Tykhenko R.

The article is devoted to the scientific substantiation of the assessment of the impact of contemporary climate change on the geoeological condition and functioning of river systems and lakes in the Polissia region of Ukraine. The relevance of the study is determined by the fact that Polissia, traditionally regarded as a region of high moisture availability, is increasingly exhibiting signs of seasonal water deficit, reduced snowmelt recharge, intensified summer–autumn low-flow conditions, lake shallowing, thermal stress in aquatic ecosystems, and the transformation of peatland and wetland landscapes. The aim of the study is to develop a conceptual and methodological approach to assessing climate-induced geoeological risks in the river-basin and lake-basin systems of Polissia. The methodological framework of the study is based on the river basin approach, landscape limnology, the hydrochemical interpretation of water quality, and the analysis of long-term hydrometeorological records. It is substantiated that, for Polissia, the most informative indicators are not only the mean annual temperature and precipitation values but, above all, seasonal and event-based indicators, including the duration of rainless periods, the frequency of winter thaws, snow cover stability, rainfall intensity, potential evapotranspiration, water temperature, water level regime, oxygen balance, trophic and saprobiological indicators, and the structure of catchment landscapes. The scientific novelty lies in the formulation of the concept of the climate–hydroecological transformation of the natural conditions of Polissia, whereby aquatic ecosystems are shifting from a predominantly snowmelt flood- and wetland-regulated regime to a regime governed by summer–autumn moisture deficit, episodic flood pulses, and the increasing influence of anthropogenic pressure on basin landscapes. The practical significance of the results lies in the possibility of applying the proposed model to monitoring changes in the condition of water resources within river-basin and lake-basin systems, planning peatland renaturalization measures, managing the functioning of small river and lake basins, and developing geoinformation systems for assessing natural resource management risks within these systems. *Key words:* Polissia, climate change, river-basin system, lake-basin system, hydrochemistry, water quality, drought, geoeological risk.

Постановка проблеми. Поліський регіон України є одним із ключових водно-екологічних просторів Східної Європи. Його річкові системи, озера, болота, торфовища та меліоровані землі утворюють складну мережу взаємодій, у межах якої зміни клімату трансформуються у зміни водності, якості води, біотичних угруповань, речовинної міграції та стабільності землекористування. Тому кліматичний



вплив на водні об'єкти Полісся не може бути редукований до лінійної залежності між середньорічною температурою повітря і рівнем води. Йдеться про перебудову функціонування басейнових систем, де атмосферні, гідрологічні, ґрунтово-торфові, ландшафтні та антропогенні чинники формують каскад взаємопов'язаних наслідків [1, 14, 16].

Актуальність дослідження. У другій половині ХХ ст. Полісся здебільшого характеризувалося як зона достатнього зволоження, значної заболоченості та відносно стійкого весняного поповнення водних ресурсів. У сучасний період, особливо після 1990-х років, ця характеристика потребує істотного уточнення. Зимове потепління зменшує тривалість стійкого снігового покриву, часті відлиги змінюють співвідношення твердих і рідких опадів, а літньо-осінні посухи підсилюють випаровування та концентрування забруднювальних речовин. Для малих річок це означає фрагментацію стоку, для озер – зниження рівнів і прискорення евтрофікаційних процесів, для боліт – перехід від водорегулювальної до емісійно-пожежонебезпечної функції [14, 16, 20].

Землевпорядний і кадастрово-моніторинговий вимір проблеми полягає в тому, що геоекологічний стан водних об'єктів дедалі більшою мірою визначається структурою водозбору: часткою лісів, лук, боліт, ріллі, забудованих територій, меліоративних каналів, прибережних захисних смуг і природоохоронних земель. Відтак оцінювання кліматичного впливу на водні системи Полісся має бути інтегроване з моніторингом землекористування, просторовим плануванням природокористування та управлінням басейновими ландшафтами [2, 6, 7].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Робота виконана відповідно до науково-технічної теми «Моніторинг геоекологічних ризиків у річкових та озерних басейнах Полісся як геоінформаційна основа забезпечення сталого управління станом водних ресурсів» (номер державної реєстрації 0118U000291), що реалізується в межах досліджень у Національному університеті біоресурсів і природокористування України, зокрема на базі навчально-наукової лабораторії картографічного моделювання проблем природокористування кафедри геодезії та картографії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методологічний фундамент дослідження річково-басейнових та озерно-басейнових систем Полісся сформовано у працях українських учених, які розвивали басейновий, еколого-геоморфологічний, ландшафтно-екологічний, гідрохімічний та гідроекологічний і лімно-екологічний підходи. У працях І. П. Ковальчука обґрунтовано необхідність комплексного аналізу басейну як геосистеми, в якій русла річок, їх заплави та водозбори, а також процеси стоку води, наносів і розчинених речовин, землекористування та інших видів антропогенного навантаження

мають розглядатися не ізольовано, а як взаємозалежні складові функціонування річково-басейнової геосистеми [6, 7]. Цей підхід є особливо продуктивним для Полісся, де слабка вертикальна розчленованість рельєфу і висока гідрологічна зв'язаність підсистем басейнового ландшафту зумовлюють швидке поширення змін від вододілу до русла або озерної чаші.

Важливою в аспекті методології дослідження озерно-басейнових систем та геоекологічних ризиків природокористування в них є стаття І. П. Ковальчука, В. Мартинюка, В. Корбутяка, І. Зубковича, Т. Павловської, В. Стельмах та Я. Курепи, присвячена геоекологічному дослідженню озерно-болотної системи Сомине [1] та інші праці цих вчених. Їх наукова цінність полягає не лише в детальній характеристиці конкретної Рамсарської водно-болотної території, а також інших озерно-басейнових систем Полісся у побудові багатокомпонентного алгоритму оцінювання геоекологічного стану озерно-басейнової системи. Автори інтегрували морфологічний, морфометричний, гідрологічний, ландшафтометричний, гідрохімічний, геохімічний, батиметричний та картографічний методи, використавши дані власних польових та лабораторних досліджень і матеріали метеорологічних спостережень за 2001–2024 рр. із метеостанції Сарни [1] та інших метеостанцій цього краю. Принциповим є висновок, що екологічний стан озера Сомине визначається не автономними властивостями водного дзеркала, а станом усього водозбору, болотного масиву, дренажної мережі та донних відкладів цього водного об'єкта. У моделі цих авторів донні відклади виступають геохімічним акумулятором і «пам'яттю» системи, а стабілізація гідроекологічного стану озера можлива лише через управління всією структурою геосистем водозбору.

Дисертаційне дослідження М. В. Боярин поглиблює розуміння річково-басейнових екосистем верхів'я Прип'яті через поєднання гідрохімічних показників, макрофітного індексу річок MIR та коефіцієнтів екологічної стабільності ландшафтів. У роботі показано, що екологічний стан води не може бути коректно інтерпретований без врахування структури та властивостей агроландшафтів і просторового розміщення стабільних та нестабільних компонентів ландшафту водозбору [2, 3]. Особливо важливими показниками геоекологічного стану річково-басейнової системи Прип'яті є розраховані значення КЕСЛ1 (змінюються в межах 0,22–5,39), КЕСЛ2 (варіація у межах 0,13–0,78), інтегрального екологічного індексу ІЕ (він становить близько 3,0 для досліджених пунктів спостережень), а також встановлення суттєвого зв'язку між КЕСЛ1, MIR та ІЕ [2, 3]. Це доводить, що ландшафтна структура є діагностичним показником гідроекологічного стану річково-басейнової системи Прип'яті.

Наукові праці Т. С. Павловської та її співавторів мають значення для осмислення річкових систем Полісся як ієрархічних басейнових утворень.

У монографічних і навчально-методичних працях, виконаних у руслі дослідження річково-басейнової системи Горині та гідрології річок, акцентовано на структурній організації річкових мереж, режимі стоку, ролі руслово-заплавних процесів і необхідності просторового узгодження гідрологічного аналізу з аналізом геоморфологічної будови басейну, природно-географічних умов і господарського впливу на його ландшафти [6, 8]. Для вирішення завдань оцінювання стану річково-басейнових систем та геоекологічних ризиків природокористування в них доробок Т. С. Павловської важливий тим, що він дозволяє перейти від характеристики окремої річки до аналізу функціонування всієї басейнової системи як просторової одиниці моніторингу та обґрунтування заходів, спрямованих на зниження ризиків природокористування в ній.

Гідрохімічний блок дослідження спирається на праці В. К. Хільчевського та його наукової школи. У цих працях якість води розглядається як результат взаємодії природної геохімічної основи, гідрологічного режиму, типу живлення та антропогенного навантаження. Також важливою складовою цих праць є обґрунтування нормативно-методичних підходів до моніторингу поверхневих вод [9–12]. Для Полісся це особливо важливо, оскільки в умовах посухи або маловоддя навіть за незмінного масового надходження біогенних елементів, органічних речовин, іонів та окремих токсикантів рівні забруднення поверхневих вод можуть істотно зростати. Тому гідрохімічний аналіз повинен виконуватися разом з аналізом даних про рівні, витрати води, її температуру та кисневий режим. При цьому має бути дотримана вимога сезонності відбору проб.

Праці М. А. Федонюка та В. В. Федонюк, присвячені Шацькому поозер'ю та Волинській області в цілому і регіональним змінам кліматичних умов розкривають вплив цього чинника на стан озерно-басейнових систем Поліського краю. Дослідження обміління озера Світязь показує, що рівневий режим великих поліських озер визначається балансом опадів, випаровування, температурного режиму, підземного живлення і водокористування [14]. У ширшому сенсі ці праці демонструють, що озера Полісся не є пасивними приймачами кліматичного сигналу: вони реагують на нього змінами рівня, прозорості, термічної структури, рекреаційної придатності та трофічного стану [14, 15].

Зарубіжні дослідження підтверджують, що озера і малі водозбори належать до найчутливіших індикаторів змін клімату, землекористування та дифузного забруднення. Супутниковий аналіз змін площ водного дзеркала озер, ландшафтно-лімнологічні підходи та дослідження зв'язку між структурою водозбору і біоіндикаційним станом водойм доводять необхідність поєднання результатів ДЗЗ, польових спостережень, гідрохімічних досліджень і картографування басейнових та аквальних ландшафтів

[23–27]. У цьому контексті українські дослідження Полісся мають потенціал для формування регіональної моделі, придатної не лише для опису поточного стану басейнових систем, а й для прогнозування геоекологічних ризиків природокористування в них.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значний науковий доробок у сфері гідроекології, лімнології, кліматології та басейнового природокористування, недостатньо розробленими залишаються концептуально-методичні засади комплексного оцінювання впливу сучасних кліматичних змін на геоекологічний стан і функціонування річково-басейнових та озерно-басейнових систем Полісся. Потребують подальшого наукового обґрунтування інтегровані підходи, що поєднують аналіз довготривалих гідрометеорологічних рядів, структури басейнових ландшафтів, гідрохімічних і біоіндикаційних показників, а також оцінювання кліматично зумовлених геоекологічних ризиків у контексті сучасних трансформацій природокористування.

Новизна. Наукова новизна статті полягає в обґрунтуванні концептуально-методичного підходу до оцінювання впливу сучасних кліматичних змін на геоекологічний стан річково-басейнових та озерно-басейнових систем Полісся, який інтегрує кліматичні, гідрологічні, гідрохімічні, біоіндикаційні та ландшафтно-басейнові індикатори. Запропоновано концепцію клімато-гідроекологічної трансформації водних систем регіону, обґрунтовано необхідність режимно-подієвого моніторингу та визначено ключові методичні засади оцінювання кліматично зумовлених геоекологічних ризиків для забезпечення сталого управління водними ресурсами Полісся.

Метою статті є розроблення науково обґрунтованої моделі оцінювання впливу змін клімату на геоекологічний стан і функціонування річкових систем та озер Поліського регіону, з акцентом на структуру басейнових ландшафтів, антропогенне навантаження на них, довгі ряди гідрометеорологічних спостережень, якість води, сезонну динаміку їх станів і ландшафтні та господарські чинники стійкості.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: визначити кліматичні показники, що найбільшою мірою впливають на стан річок та озер Полісся; обґрунтувати значення рядів спостережень 1961–1990 і 1991–2025 рр. для виявлення трендів, циклічності та екстремумів; розкрити механізм переходу метеорологічної посухи у гідроекологічний стрес; узагальнити інформацію про річний цикл функціонування водних систем за сучасного клімату; сформулювати напрями моніторингу геоекологічних ризиків басейнового природокористування в басейнових системах Полісся.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження виконано як аналітико-синтезуючу

наукову розробку, спрямовану на узагальнення результатів попередніх польових, лабораторних, гідрометеорологічних, гідрохімічних, ландшафтно-екологічних і картографічних досліджень водних систем Полісся. Джерельну основу становили наукові праці з басейнової геоecології, ландшафтно-лімнології, гідрохімії, кліматології, гідробіологічної індикування та нормативні документи з управління водними ресурсами [1–5, 9, 17–19].

Методологічно стаття спирається на чотири взаємопов'язані підходи. Перший – басейновий, за яким річка, озеро або болото розглядаються не як ізольований водний об'єкт, а як ядро функціонування відповідної річково-басейнової чи озерно-басейнової системи [1, 6, 7]. Другий – ландшафтно-екологічний, який враховує співвідношення стабільних і нестабільних елементів водозбору, особливості землекористування, наявність меліоративних систем і прибережних захисних смуг [2, 3]. Третій – гідрохімічний, який дозволяє інтерпретувати якість води як результат врахування впливу на неї водності, температури, речовинного навантаження й нормативної методики оцінювання [9–12, 19]. Четвертий – клімато-гідрологічний, орієнтований на порівняння референційного періоду 1961–1990 рр. із сучасним періодом 1991–2025 рр. відповідно до логіки кліматичних норм та постреференційного аналізу [17, 20].

Особливу увагу приділено тривалості гідрометеорологічних рядів. Ряди тривалістю 10–15 років можуть бути корисними для виявлення окремих аномалій, але вони недостатні для відокремлення кліматичного тренду від міжрічної мінливості. Тридцятирічні ряди відповідають стандартній кліматологічній логіці та дають змогу порівнювати норми, а ряди 60 років і більше дозволяють аналізувати багаторічні фази, циклічно-періодичні компоненти, повторюваність екстремальних подій і стійкість зміни режиму [17].

Якість води у порівнянні 1961–1990 і 1991–2025 рр. цих двох періодів повинна оцінюватися після гармонізації пунктів спостережень, сезонності відбору проб, аналітичних методик і нормативних шкал. Без такої процедури пряме порівняння середніх концентрацій може бути методично некоректним. Тому запропонована у статті модель акцентує не на декларативному зіставленні окремих показників, а на визначенні механізмів зміни водного режиму та якості води в річково-басейнових системах через інтегровані блоки показників: кліматичний, гідрологічний, гідрохімічний, біоіндикаційний і ландшафтно-басейновий (табл. 1).

Як узагальнення цієї інформації запропоновано індекс клімато-гідроекологічної вразливості, який трактується як зважена інтеграція нормованих показників кліматичного дефіциту, гідрологічної маловодності, термічного стресу, гідрохімічної напруги, ландшафтно-нестабільності та біоіндикаційної відповіді (табл. 2). Індекс не підмінює чинні державні методики екологічної оцінки вод, а доповнює їх ризик-орієнтованою процедурою для територій, де якість води значною мірою залежить від сезонного дефіциту вологи, стану торфовищ і структури ландшафтів водозбору [18, 19].

Викладення основного матеріалу. Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що у Поліссі формується режимний зсув, який доцільно визначати як клімато-гідроекологічне трансформування станів і функціонування річково-басейнових та озерно-басейнових систем. Його суть полягає у переході від відносно стійкої моделі, де весняне сніготанення, акумуляція вологи в болотах, акумуляція і повільне ґрунтово-підземне живлення підтримували оптимальну водність річок та озер, до моделі, в якій водний режим дедалі більше контролюється нестабільними зимовими відлигами, короткими зливовими імпульсами, літньо-осінньою посухою та збільшенням випаровувальних втрат [14, 16, 20].

Таблиця 1

Ключові кліматичні та гідроекологічні індикатори для моніторингу гідроекологічного стану водних систем Полісся та геоecологічних ризиків

Блок показників	Приклади індикаторів	Геоecологічне значення	Об'єкти застосування
Кліматичний	Температура повітря, сезонні опади, зимові відлиги, бездощові періоди	Визначає водний дефіцит, снігове живлення, випаровуваність і термічний стрес	Річки, озера, болота
Гідрологічний	Рівні води, витрати, межень, паводки, тривалість льодоставу	Фіксує зміну режиму стоку, водності й гідравлічної зв'язаності	Річкові системи, озера
Гідрохімічний	O ₂ , БСК, біогенні речовини, мінералізація, органічна речовина, токсиканти	Показує якість води, концентраційний ефект посухи та внутрішнє навантаження	Водні масиви
Біоіндикаційний	MIR, макрофіти, фітопланктон, сапробність	Відображає інтегральну реакцію екосистеми на тривалий тиск на неї	Річки, озера, заплавні водойми
Ландшафтний	Лісистість, заболоченість, розораність, ПЗФ, меліорованість, прибережні смуги	Визначає буферну здатність ландшафтів водозбору і дифузний стік	Річкові та озерні басейни

Таблиця 2

Методичне значення тривалості рядів спостережень для оцінювання кліматично зумовлених змін геоєкологічних станів басейнових ландшафтів

Тривалість ряду	Аналітичні можливості	Обмеження	Рекомендоване використання
10–15 років	Виявлення окремих екстремумів і коротких тенденцій	Недостатньо для кліматичних висновків	Оперативний моніторинг і попередня діагностика
30 років	Порівняння кліматичних норм, оцінка зсуву режиму	Потребує однорідності методик	Порівняння 1961–1990 та 1991–2020/2025 рр.
60 і більше років	Аналіз трендів, циклічності, фазовості та повторюваності екстремумів	Проблеми пропусків і зміни пунктів спостережень	Стратегічна оцінка клімато-гідроєкологічних ризиків

Найбільш інформативними для оцінювання цього процесу є сезонні й подієві кліматичні індикатори. Середньорічна температура і річна сума опадів залишаються необхідними, однак вони часто маскують критичні зміни. Для річкових систем значно важливішими є тривалість бездошових періодів, інтенсивність і тривалість злив, частка твердих опадів у холодний сезон, наявність і стабільність снігового покриву, повторюваність зимових відлиг і термічний режим води. Для озер особливе значення мають випаровуваність, температура поверхневого шару, тривалість льодоставу, рівневий режим і баланс між атмосферним та підземним живленням [14, 15, 17].

У період 1961–1990 рр. водні системи Полісся функціонували за умов відносно стабільнішої сезонної структури зволоження. Весняне водопілля відіграло важливу роль у поповненні водних ресурсів заплав, промиванні русел, підживленні озерно-болотних комплексів і підтриманні нерестових біотопів. У 1991–2025 рр. посилилася тенденція до зменшення висоти і тривалості існування снігового покриву, збільшення частки рідких опадів узимку, зміщення піків стоку, збільшення тривалості мало-водних фаз та посилення літнього термічного навантаження. Навіть там, де річні суми опадів не демонструють катастрофічного зменшення, їх сезонний перерозподіл і збільшення епізодичності істотно змінюють функціонування екосистем річкових та озерних систем [16, 17, 20].

Посуха у Поліссі має розглядатися як комплексний гідроєкологічний стрес. Тривала відсутність опадів спочатку зменшує ґрунтову вологість і поповнення ґрунтових вод, далі знижує меженний стік, а потім підвищує температуру води, зменшує концентрацію розчиненого кисню, посилює біохімічне споживання кисню і сприяє активізації процесів евтрофікації водойм. За низьких рівнів води зростає концентрація розчинених речовин, активізується внутрішнє навантаження на водну компоненту з донних відкладів, а при осушенні торфовищ посилюються мінералізація органічної речовини, винос біогенного матеріалу і пожежна небезпека [1, 9, 11, 16].

Перша інтенсивна злива після тривалої посухи не завжди поліпшує якість води. Навпаки, вона може

спричиняти імпульсний змив з водозбору накопичених забруднювальних речовин, пилу, органічних решток, компонентів добрив і продуктів мінералізації торфу. У результаті формується гідрохімічний імпульс, який супроводжується короточасним зростанням каламутності, вмісту біогенних елементів, органічної речовини і бактеріального навантаження. Саме такі події часто залишаються недооціненими в календарному моніторингу, якщо відбір проб не прив'язаний до гідрометеорологічних подій [9, 19].

Річний цикл функціонування водних систем Полісся зазнає помітної трансформації. Узимку часті відлиги і нестійкий льодовий режим змінюють аерацію, термічну стратифікацію мілких водойм і характер зимового стоку. Навесні ослаблення снігового водопілля зменшує промивну і водопоповнювальну функцію повені. Влітку зростає ризик кисневого дефіциту, цвітіння води, концентрації забруднювачів і деградації малих водотоків та мілководних озер. Восени водні системи можуть частково відновлюватися за рахунок опадів, однак після тривалих посух перші дощові епізоди нерідко погіршують якість води через імпульсний змив [14, 16].

Озерно-басейновий аспект цієї проблеми найбільш переконливо демонструють дослідження Соминого і Світязя. Для Соминого ключовим є висновок, що озеро не може бути відновлене без регулювання дренажної мережі та відновлення гідрологічної функції болотного масиву [1]. Для Світязя показовим є поєднання кліматичних і водогосподарських чинників, яке проявляється у зниженні рівня води і посиленні суспільної чутливості до обміління рекреаційно значущих озер [14]. Разом ці приклади доводять: озера Полісся мають аналізуватися як озерно-басейнові системи, в яких водний баланс, донні відклади, літораль, підземне живлення і землекористування є взаємопов'язаними елементами.

Річково-басейновий аспект найповніше розкрито у роботах М. В. Боярин щодо верхів'я Прип'яті. Середні значення екологічного індексу ІЕ, значення MIR і коефіцієнти екологічної стабільності ландшафтів показують, що кращий гідроєкологічний стан властивий ділянкам із вищою часткою екостабільних елементів – лісів, природних лук, заболоче-

них територій, природоохоронних площ. Навпаки, урбанізовані ділянки, інтенсивне сільськогосподарське використання земель, порушені меліоративні системи та дифузні джерела забруднення знижують буферну здатність басейну [2, 3].

Для басейнів Стиру, Стоходу, Турії, Вижівки, Горині та верхів'я Прип'яті кліматичний ризик доцільно оцінювати як результат взаємодії трьох множників: кліматичного дефіциту вологи, ландшафтної нестабільності водозбору та антропогенного навантаження. Високий ризик формується там, де посуха накладається на осушені торфовища, випрямлені або замулені русла, низьку лісистість, високу частку ріллі та недостатню очищеність стічних вод, які скидаються в річки чи озера. Низький ризик характерніший для басейнів із вищою часткою природних ландшафтів, збереженими заплавами, водно-болотними угіддями і ширшими прибережними буферними смугами [2, 6, 7].

Наукова новизна виконаного узагальнення полягає у трьох положеннях. По-перше, запропоновано концепцію клімато-гідроекологічного трансформування озерно-басейнових і річково-басейнових систем Полісся, що описує не окремий тренд температури чи рівня води, а зміну логіки функціонування водних систем. По-друге, сформульовано поняття інверсії буферної функції водозбору: осушені або деградовані торфово-болотні ландшафти за умов потепління і посухи можуть переходити від функції фільтра та акумулятора води до функції джерела біогенних елементів, органічних речовин, поступаючих у водні об'єкти і викликаючих ризики виникнення пожеж в одних випадках та гідрохімічної нестабільності – в інших. По-третє, обґрунтовано необхідність режимно-подієвого моніторингу, який фіксує не лише календарні середні значення, а й посухи, зливи, відлиги, паводкові імпульси та післяпосухові зливи (табл. 3).

Практична значущість полягає у можливості переходу від пасивного спостереження до управління геоекологічною стійкістю озерно-басейнових та річково-басейнових систем. Для цього необхідно створювати паспорти клімато-гідроекологічної вразливості для пріоритетних річкових та озерних басейнів, поєднувати гідрохімічний контроль із біоіндикацією, відновлювати водний режим осушених боліт, обмежувати дифузний стік із сільськогосподарських угідь, забезпечувати функціонування прибережних захисних смуг і розвивати ГІС-модулі басейнового моніторингу та моніторинг геоекологічних ризиків [1, 2, 18, 19].

Головні висновки. Зміни клімату впливають на річкові системи та озера Поліського регіону через комплексний механізм, який охоплює підвищення температури повітря, ґрунту і води, зміни в сезонному перерозподілі опадів, зменшення стійкості снігового покриву, зростання евапотранспірації, подовження бездощових періодів, збільшення ролі зливових імпульсів і трансформацію торфово-болотних ландшафтів. Наслідками є зміни водності, рівневого режиму, кисневого балансу, гідрохімічної структури водних об'єктів, трофічного стану і біотичних угруповань.

Найбільш релевантними кліматичними показниками для оцінки геоекологічного стану водних систем Полісся є сезонні температури повітря і води, тривалість бездощових періодів, інтенсивність опадів, висота і стабільність снігового покриву, частота зимових відлиг, тривалість льодоставу, потенційна евапотранспірація, дефіцит ґрунтової вологи та повторюваність екстремальних подій. Середньорічні показники мають використовуватися лише як фонові. Порівняння періодів 1961–1990 і 1991–2025 рр. є методично доцільним для виявлення постреференційного кліматичного зсуву, однак оцінювання якості води та її змін потребує гармонізації пунктів спостережень, методик аналізу, сезонності відбору проб

Таблиця 3

Основні механізми впливу змін клімату на річково-басейнові та озерно-басейнові системи Полісся

Кліматичний чинник	Безпосередній гідрологічний ефект	Гідрохімічна або біотична відповідь	Управлінська реакція
Зимове потепління і відлиги	Зменшення акумуляції талої води, зміщення водопілля	Слабше весняне промивання русел, нестійкий льодовий режим	Збереження заплав і болотних акумуляторів вологи
Тривала літня посуха	Зниження рівнів води в річках та озерах, фрагментація стоку, надмірне прогрівання води	Кисневий дефіцит, концентрація біогенних елементів, евтрофікація водойм	Подієвий моніторинг, обмеження водозабору
Інтенсивні зливи після посухи	Короткий паводковий імпульс і поверхневий злив	Надходження органіки, компонентів добрив, завислих речовин	Буферні смуги, контроль дифузного стоку
Деградація торфовищ	Втрата водорегулювальної функції, пожежний ризик	Винос біогенних елементів і продуктів мінералізації торфу	Ренатуралізація боліт, підняття рівнів води
Підвищення температури води	Посилення стратифікації і біопродуктивності водойм	Цвітіння води, зміна макрофітів, дефіцит O ₂	Біоіндикація, обмеження рекреаційного та іншого господарського навантаження, охоронні заходи

та удосконалення нормативних оцінювальних шкал. Без такої гармонізації пряме зіставлення концентрацій може призводити до хибних висновків.

Посуха в Поліссі є не лише метеорологічним, а насамперед гідроекологічним явищем. Вона знижує рівні води, підвищує її температуру, погіршує кисневий режим, зумовлює концентрацію забруднювальних речовин, активізує внутрішнє геохімічне навантаження на водну і біотичну компоненти донних відкладів і підсилює мінералізацію осушених торфовищ. Післяпосушні зливи потребують окремого моніторингу як події підвищеного ризику для погіршення якості води.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні ГІС-орієнтованої системи моніторингу клімато-гідроекологічної і геоєкологічної вразливості річково-басейнових та озерно-басейнових систем Полісся, розрахунку запропонованого індексу ризиків для конкретних річкових та озерних систем та їх басейнів, порівнянні даних наземного моніторингу з матеріалами ДЗЗ, а також у розробленні сценаріїв ренатуралізації боліт, відновлення водності малих водотоків та озер й оптимізації структури землекористування на їхніх водозборах.

Література

1. Kovalchuk, I., Martyniuk, V., Korbutiak, V., Zubkovich, I., Pavlovskaya, T., Stelmakh, V., & Kurepa, Y. (2026). Geoeological Study of Lake and Basin Systems: An Applied Analysis of the Somyne Ramsar Wetland, Ukraine. *Limnological Review*. 26(2), 15. DOI: <https://doi.org/10.3390/limnolrev26020015>
2. Боярин М. В. Оптимізація екологічного стану річково-басейнових екосистем верхів'я Прип'яті в контексті сталого розвитку: дис. ... доктора с.-г. наук: 03.00.16. Луцьк, 2025. 354 с.
3. Боярин М. В. Оптимізація екологічного стану річково-басейнових екосистем верхів'я Прип'яті в контексті сталого розвитку: реферат дис. ... доктора с.-г. наук: 03.00.16. Рівне, 2025. 43 с.
4. Malovanyu M. S., Boiaryn M., Muzychenko O. et al. Assessment of the environmental state of surface water of right-bank tributaries of the upper reaches of the Pripet River by macrophyte index MIR. *Journal of Water and Land Development*. 2022. No. 55. P. 97–103. DOI: 10.24425/jwld.2022.142310.
5. Nekos A., Boiaryn M., Tsos O., Netrobchuk I., Voloshyn V. Determination of the Macrophyte Index MIR as an indicator of water quality in the Pripet River. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series Geology. Geography. Ecology*. 2023. № 58. P. 360–370. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2023-58-27>.
6. Ковальчук І. П., Павловська Т. С. Річково-басейнова система Горині: структура, функціонування, оптимізація: монографія. Луцьк: РВВ «Вежа» Волинського національного університету імені Лесі Українки, 2008. 244 с.
7. Ковальчук І. П., Ковальчук А. І., Ковальчук І. І., Царик Л. П., Павловська Т. С., Пилипович О. В. Концептуальні засади досліджень геоєкологічного стану річково-басейнових систем та їх цифрового атласного картографування. *Наукові записки ТНПУ. Серія: Географія*. 2023. № 2 (55). DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.23.2.1>
8. Павловська Т. С. Гідрологія річок: навчальний посібник. Луцьк: Вежа-Друк, 2023. 156 с.
9. Хільчевський В. К. Моніторинг вод в Україні: методи оцінювання якості води для різних цілей у зв'язку зі змінами нормативної бази (2014–2021 рр.). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. № 3(61). С. 6–19. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.3.1>.
10. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С. М. Регіональна гідрохімія України. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2019. 343 с.
11. Хільчевський В. К., Осадчий В. І., Курило С.М. Основи гідрохімії. К.: Ніка-Центр, 2012. 326 с.
12. Khilchevskyi, V. K., Kurylo, S. M., & Sherstyuk, N. P. (2018). Chemical composition of different types of natural waters in Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 27 (1), 68-80. DOI: <https://doi.org/10.15421/111832>
13. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A. et al. Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water infrastructure. *Nat Sustain* 6, 578–586 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01068-x>
14. Fedoniuk V., Khrystetska M., Fedoniuk M., Merlenko I., Bondarchuk S. Shallowing of the Svitvaz Lake in the context of regional climate change. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2020. Vol. 29(4). P. 673–683.
15. Федонюк В. В., Іванців В. В., Жадько О. А., Федонюк М. А. Порівняльний аналіз комфортності погоди протягом курортного сезону в національних природних парках Волинської області. *Екологічні науки*. 2023. № 4(49). С. 232–237. DOI: 10.32846/2306-9716/2023.eco.4.49.31.
16. Boychenko S., Kuchma T., Karamushka V., Maidanovych N., Kozak O. Wildfires and Climate Change in the Ukrainian Polissia During 2001–2023. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(5). Article 2223. DOI: 10.3390/su17052223.
17. World Meteorological Organization. WMO Climatological Normals. Geneva: WMO, 2024. URL: <https://community.wmo.int/site/knowledge-hub/programmes-and-initiatives/climate-services/wmo-climatological-normals>.
18. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy. *Official Journal of the European Communities*. 2000. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/eng>.
19. Про затвердження Методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод, а також віднесення штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного потенціалу штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод: Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 14.01.2019. № 5. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0127-19#Text>.
20. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
21. Вишневецький В. І. Річки і водойми України. Стан і використання. Київ: [б.в.], 2000. 376 с.
22. Яцик А. В. Водогосподарська екологія. У 4-х томах, 7 кн. Т. 2: Кн. 3–4. Київ: Генеза, 2004. 384 с.

23. Martyniuk, V., Kovalchuk, I., Zubkovych, I., Pavlovska, T., & Sukhodolska, I. (2024). The geoecological analysis of Lake Tuchne (Volyn Polissia) and assessment of sapropel reserves in it. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 33(1). 118-131. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112413>.
24. Kirvel I., Martyniuk V., Kovalchuk I., Andronache I., Korbutiak V., Zubkovych I. A. Cartographic landscape analysis of the geoecological condition of the natural reserve object – Lake Doshne (Volyn Polissya, Ukraine). *Limnological Review*. 2024. Vol. 24. P. 385–405. DOI: <https://doi.org/10.3390/limnolrev24030023>.
25. Sheng Y., Song C., Wang J. et al. Representative lake water extent mapping at continental scales using multi-temporal Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2016. DOI: 10.1016/j.rse.2015.12.041.
26. Grzybowski M. et al. Correlation between catchment land use/cover and macrophyte assessment of lake ecological status. *Ecological Indicators*. 2023. Vol. 146. Article 109857. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109857>.
27. Zhang F., Chen Y., Wang W. et al. Impact of land-use/land-cover and landscape pattern on seasonal in-stream water quality in small watersheds. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 357. Article 131907. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.131907.

Дата першого надходження статті до видання: 02.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

УДК 628.4:004.9:502.17

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.4-67.38>

МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТА МАСШТАБУВАННЯ ЦИФРОВОЇ E-WASTE ПЛАТФОРМИ В СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ІНТЕГРАЦІЇ

Філін В.В.¹, Улицький О.А.², Фролов В.Ф.³

¹Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

²ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»
пр. Академіка Палладіна, 34А, 02000, м. Київ

³Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Віталія Грицаєнка, 24, 36000, м. Полтава
volodymyr_filin@ukr.net, olegulytsky@gmail.com, frolov19470308@ukr.net

Означені й обґрунтовані методологічні засади впровадження та масштабування цифрової E-Waste платформи в системі управління відходами України в контексті європейської інтеграції. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю цифрової трансформації сфери управління відходами, підвищення прозорості руху відходів, удосконалення взаємодії між учасниками відходів, ліцензованими операторами, територіальними громадами та органами державної влади, а також потребою у практичних інструментах імплементації європейських підходів до циркулярної економіки та екологічного врядування. Окреслено шляхи розроблення структурованої методологічної моделі впровадження та подальшого масштабування E-Waste платформи як цифрового інструменту управління потоками відходів, верифікації учасників ринку, забезпечення простежуваності операцій та формування аналітичної бази для прийняття управлінських рішень. Запропоновано поетапну модель розвитку платформи: MVP, пілот, регіональне масштабування, інтеграція з державними електронними системами та формування національної цифрової екосистеми управління відходами. Визначено ключові функціональні модулі, групи стейкхолдерів, систему KPI та основні ризики впровадження. Додатково узагальнено критерії оцінювання результативності платформи для громад, бізнесу, операторів ринку та державних органів, що дозволяє пов'язати цифровий функціонал із практичними завданнями моніторингу, планування та контролю потоків відходів. Зроблено висновок, що E-Waste платформа може бути не лише комерційним цифровим продуктом, але й прикладним інструментом екологічного врядування, підтримки циркулярної економіки, запобігання нелегальному поводженню з відходами та посилення інституційної спроможності України у сфері євроінтеграційної трансформації системи управління відходами. *Ключові слова:* управління відходами, E-Waste платформа, цифровізація, GIS, циркулярна економіка, європейська інтеграція, екологічне врядування, простежуваність потоків відходів, KPI, цифровий маркетплейс.

Methodological framework for the implementation and scaling of the digital E-Waste platform in Ukraine's waste management system in the context of European integration. Filin V., Ulytskyi O., Frolov V.

The article substantiates the methodological framework for the implementation and scaling of the digital E-Waste platform within Ukraine's waste management system in the context of European integration. The relevance of the study is determined by the need for digital transformation in the waste management sector, improved transparency of waste flows, enhanced interaction among waste generators, licensed operators, territorial communities and public authorities, as well as the need for practical tools to support European approaches to circular economy and environmental governance. The purpose of the article is to develop a structured methodological model for implementing and scaling the E-Waste platform as a digital tool for managing waste flows, verifying market participants, ensuring traceability of waste-related operations and forming an analytical basis for management decision-making. The article proposes a phased development model: MVP, pilot implementation, regional scaling, integration with state electronic systems and formation of a national digital waste management ecosystem. Key functional modules, stakeholder groups, KPI system and implementation risks are identified. The study additionally systematizes performance assessment criteria for communities, business entities, market operators and public authorities, which makes it possible to link the platform's digital functionality with practical tasks of monitoring, planning and controlling waste flows. It is concluded that the E-Waste platform can serve not only as a commercial digital product, but also as an applied instrument of environmental governance, support for circular economy, prevention of illegal waste management practices and strengthening Ukraine's institutional capacity in the field of European integration-driven transformation of the waste management system. *Key words:* waste management, E-Waste platform, digitalization, GIS, circular economy, European integration, environmental governance, waste flow traceability, KPI, digital marketplace.



© Філін В.В., Улицький О.А., Фролов В.Ф., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Вступ. Сучасний етап розвитку системи управління відходами в Україні характеризується одночасною дією кількох процесів: трансформацією природоохоронного законодавства відповідно до європейських підходів, потребою у прозорості руху відходів, формуванням інфраструктури циркулярної економіки та зростанням значення цифрових інструментів екологічного врядування [1; 2; 6; 7]. У таких умовах управління відходами вже не може розглядатися лише як сукупність технічних операцій зі збирання, перевезення, оброблення чи видалення. Воно набуває ознак складної міжсекторальної системи, у якій поєднуються екологічні, економічні, правові, інформаційні, просторові та управлінські компоненти.

Прийняття Закону України «Про управління відходами» стало важливим чинником наближення національного регулювання до європейської моделі [1]. Водночас ефективність його імплементації залежить не лише від нормативної бази, а й від спроможності суб'єктів системи забезпечувати облік, простежуваність, верифікацію операцій, контроль виконавців та обмін достовірними даними. Європейська рамкова Директива 2008/98/ЄС закріплює орієнтацію на запобігання утворенню відходів, зменшення негативного впливу управління ними, підвищення ресурсної ефективності та розвиток ієрархії управління відходами [5].

Національна стратегія управління відходами до 2030 року та Національний план управління відходами до 2030 року окреслюють системний підхід до реформування галузі [3; 4]. Проте їх практична реалізація ускладнюється фрагментованістю даних, недостатньою цифровою інтеграцією між учасниками ринку, нерівномірним розвитком інфраструктури та обмеженими можливостями громад щодо моніторингу потоків відходів. Це зумовлює потребу у прикладних цифрових рішеннях, здатних забезпечити прозору взаємодію між утворювачами відходів, ліцензованими операторами, органами місцевого самоврядування, державними органами та громадськістю.

У цьому контексті цифрова E-Waste платформа розглядається не лише як технологічний продукт, але як і прикладний інструмент екологічного врядування. Її потенціал полягає у поєднанні функцій екологічного маркетплейсу, геоінформаційної аналітики, верифікації контрагентів, формування заявок, моніторингу операцій, звітності та оцінювання ефективності. Попередні дослідження авторів спрямовувалося на обґрунтування потреби в програмному забезпеченні управління відходами та опис MVP-продукту E-Waste платформи [9; 10]. Наступний, логічний етап – розроблення методології її впровадження, пілотування, масштабування та інтеграції у систему управління відходами України.

Наукова сутність статті зумовлена відсутністю цілісної методологічної моделі впровадження циф-

рових платформ управління відходами, що поєднувала б нормативно-правові вимоги, євроінтеграційні орієнтири, інституційні ролі учасників, функціональну архітектуру цифрового рішення, показники ефективності, ризики впровадження та механізми подальшого масштабування. Така прогалина означила актуальність дослідження та його значення для природоохоронного напрямку.

Аналіз досліджень та публікацій. Проблематика цифровізації управління відходами дедалі частіше розглядається у науковій літературі як один із напрямів модернізації природоохоронної політики, підвищення ефективності екологічного врядування та переходу до циркулярної економіки. Традиційні підходи, що базуються переважно на адміністративному регулюванні, паперовій звітності та фрагментарному обліку, не забезпечують достатнього рівня прозорості, простежуваності та аналітичної підтримки управлінських рішень. Тому сучасні дослідження зосереджуються на цифрових платформах, GIS-рішеннях, електронних реєстрах, автоматизованому моніторингу та механізмах перевірки учасників ринку.

У міжнародному дискурсі цифрові рішення у сфері управління відходами розглядаються як складові ширшої системи прийняття рішень на основі даних, що узгоджується з підходами до відкритих даних, цифрового врядування та аналітики у сфері управління ресурсами [14; 20]. Глобальні огляди управління відходами підкреслюють потребу у якісних даних, інституційній спроможності та прозорості потоків відходів [12; 13]. Дослідження електронних відходів акцентують увагу на поєднанні технологічних, економічних, соціальних, екологічних і політичних чинників [11; 19]. Роботи щодо циркулярної економіки показують, що ефективне управління ресурсами потребує не лише технологій перероблення, а й нових моделей взаємодії, обліку, прозорості потоків та інституційної підтримки [15–18].

Окремий напрямок пов'язаний із використанням онлайн-платформ з метою організації збирання, передавання, перероблення або повторного використання відходів. У такій діяльності значну увагу приділено поведінці користувачів, довірі до цифрових сервісів, зручності інтерфейсу, сприйняттю ризиків і здатності платформ зменшувати транзакційні витрати між утворювачами відходів та операторами. В Україні така проблема поглиблюється процесами реформування галузі, післявоєнними викликами та необхідністю створення інформаційної бази для управління відходами на місцевому та регіональному рівнях.

Практичний вимір цифровізації підтверджується проектом UNDP Digital Waste Management / E-Waste System, який передбачає створення електронної інформаційної системи для відстеження циклу відходів від утворення до оброблення або видалення [8]. Водночас державні системи переважно виконують

функції офіційного обліку, адміністрування, контролю та звітності, тоді як прикладні marketplace-платформи можуть забезпечувати більш гнучкий рівень взаємодії: пошук виконавців, верифікацію контрагентів, геолокаційний аналіз, зворотний зв'язок і первинну аналітику для користувачів.

Попередні оприлюднені праці авторів сформували підґрунтя для цього дослідження. Одна з них обґрунтовує створення програмного забезпечення у сфері управління відходами як прикладного інструменту імплементації європейських нормативно-правових підходів [10]. Інша – описує інноваційний MVP-продукт E-Waste платформи на українському ринку, її GIS-компонент, аналітичний модуль, перевірку учасників ринку та потенціал масштабування [9]. Отже, науковий підхід передбачає перехід від концепції і MVP до методології впровадження, інституційної інтеграції та оцінювання ефективності.

Аналіз літератури засвідчує, що для українського контексту недостатньо дослідженим залишається питання поетапного масштабування таких платформ із урахуванням нормативно-правових вимог, інституційної структури, потреб громад, ринкових механізмів і євроінтеграційних зобов'язань. Саме це визначає необхідність подальшого дослідження методологічних засад впровадження цифрової E-Waste платформи.

Мета роботи. Мета наукової праці – обґрунтування методологічних засад впровадження та масштабування цифрової E-Waste платформи в системі управління відходами України в контексті європейської інтеграції з урахуванням сучасних вимог до цифровізації екологічного врядування, забезпечення простежуваності потоків відходів, підвищення прозорості взаємодії між учасниками ринку та формування передумов для переходу до циркулярної економіки.

Досягнення цієї мети передбачає розгляд E-Waste платформи не лише як окремого цифрового продукту або MVP, аде й потенційного елемента ширшої цифрової екосистеми управління відходами. Така екосистема має поєднувати інтереси утворювачів відходів, операторів ринку, територіальних громад, органів державної влади, інвесторів, донорських організацій та громадськості.

Основними завданнями дослідження є: визначити передумови цифровізації управління відходами в Україні; окреслити місце E-Waste платформи у системі екологічного врядування; сформувати модель стейкхолдерів; обґрунтувати функціональну архітектуру платформи; запропонувати поетапну модель впровадження і масштабування; визначити систему KPI; ідентифікувати ризики та заходи управління ними; обґрунтувати очікуваний екологічний, управлінський і соціально-економічний ефект; окреслити перспективи інтеграції платформи з державними реєстрами, GIS-інструментами, API-обміном і аналітичними панелями.

Методика досліджень. Методологічну основу дослідження становить міждисциплінарний підхід до аналізу цифрової трансформації системи управління відходами України, що поєднує природоохоронні, управлінські, правові, інформаційно-технологічні, економічні та соціальні аспекти. Такий підхід необхідний, оскільки впровадження E-Waste платформи не може бути зведене лише до створення програмного забезпечення. Йдеться про формування прикладного інструменту екологічного врядування, що має функціонувати в межах чинної системи управління відходами, відповідати євроінтеграційним орієнтирам і забезпечувати прозорість потоків відходів.

Матеріалами дослідження є положення законодавства України у сфері управління відходами та охорони довкілля; документи ЄС щодо управління відходами, циркулярної економіки і цифровізації; наукові праці українських та зарубіжних дослідників; попередні публікації автора; а також прикладні матеріали концептуального моделювання E-Waste платформи, зокрема її реєстраційного модуля, верифікації операторів, GIS-картування, marketplace-взаємодії, аналітичного кабінету, звітності, мобільного застосунку та інтеграційного API.

У дослідженні застосовано системний аналіз, що дозволив розглянути платформу як елемент багаторівневої системи управління відходами. Порівняльно-правовий метод використано для зіставлення національних підходів з європейськими принципами ієрархії управління відходами, простежуваності, циркулярної економіки та електронного обліку. Функціональне моделювання застосовано для визначення структури платформи, її модулів, взаємозв'язків і ролі у процесі масштабування.

Метод stakeholder mapping дозволив визначити основних учасників процесу впровадження: утворювачів відходів, операторів, органи місцевого самоврядування, центральні та регіональні органи влади, громадськість, бізнес, інвесторів, донорів та IT-провайдерів. GIS-орієнтований аналіз використано для обґрунтування ролі просторових даних у картуванні точок утворення відходів, операторів, маршрутів, проблемних територій і потенційних зон ризику.

Ризик-орієнтований підхід застосовано для ідентифікації ризиків низької якості даних, недовіри учасників ринку, кібербезпеки, фінансової нестабільності, регуляторної невизначеності та слабкої інтеграції з державними системами. KPI-based approach використано для формування системи операційних, екологічних, управлінських, економічних, соціальних і цифрових показників. Додатково застосовано SWOT-аналіз і поетапне сценарне моделювання, що дозволило описати розвиток платформи від MVP до національної цифрової екосистеми управління відходами.

Основні результати дослідження. Результати дослідження дозволяють обґрунтувати E-Waste платформу як прикладний інструмент модернізації системи управління відходами України. На відміну від традиційних моделей, що базуються на адміністративному контролі, паперовій звітності та фрагментарній взаємодії, запропонований підхід передбачає формування цифрового середовища, у межах якого учасники системи можуть обмінюватися інформацією, шукати виконавців, перевіряти статус контрагентів і накопичувати аналітичні дані щодо потоків відходів.

Основним результатом є методологічна модель впровадження та масштабування E-Waste платформи як елемента цифрової екосистеми екологічного врядування. Її функціонування спрямоване на три ключові результати: підвищення простежуваності потоків відходів, зменшення ризиків нелегального поводження з ними та формування якісної інформаційної бази для прийняття управлінських рішень. Платформа може виконувати роль проміжної ланки між державними електронними системами та практичними потребами ринку, доповнюючи державну інфраструктуру більш гнучким користувацьким інтерфейсом.

Концептуальна модель впровадження E-Waste платформи

Запропонована концептуальна модель базується на розумінні E-Waste платформи як цифрового середовища, у якому поєднуються чотири функціональні контури: ринковий, управлінський, аналітичний і контрольний. Ринковий контур забезпечує взаємодію між утворювачами відходів та операторами; управлінський орієнтований на потреби громад і органів влади; аналітичний забезпечує оброблення, візуалізацію і тлумачення даних; контрольний пов'язаний із верифікацією операторів, перевіркою документів, відстеженням операцій і зменшенням ризиків недобросовісної діяльності.

Стейкхолдери та функціональна архітектура

Ефективність впровадження платформи залежить від належного залучення основних стейкхолдерів: утворювачів відходів, операторів управління відходами, територіальних громад, державних органів, бізнесу, громадськості, донорів, інвесторів

та IT-провайдерів. Утворювачі формують попит, оператори забезпечують пропозицію, громади використовують дані для управління територією, державні органи отримують додаткову аналітику, а громадськість може брати участь у виявленні проблемних точок.

Функціональна архітектура платформи має забезпечувати не лише базову взаємодію між користувачами, але й накопичення якісних даних, їх аналіз, верифікацію та подальшу інтеграцію з іншими цифровими системами. До основних модулів належать реєстраційний модуль, модуль верифікації операторів, GIS-модуль, marketplace-модуль, аналітичний кабінет, модуль звітності, мобільний застосунок, інтеграційний API, модуль зворотного зв'язку та ризик-моніторингу.

Поетапна модель впровадження та масштабування

Запропонована модель передбачає, що цифрове рішення у сфері управління відходами не може бути одномоментно задіяне на національному рівні без попереднього тестування, адаптації функціоналу та перевірки операційної моделі. Тому впровадження має відбуватися планомірно: від MVP до національної екосистеми.

На етапі MVP основним завданням є перевірка базової гіпотези щодо потреби ринку, засвідчити готовність користувачів, затребуваність функцій, бар'єри використання та реальну якість даних. Регіональне масштабування потребує стандартизації даних, модерації, підтримки користувачів і базових аналітичних панелей. Інтеграція з державними системами має відбуватися після стабілізації функціоналу та формування надійної моделі даних.

KPI та ризики впровадження

Для оцінювання результативності платформи запропоновано систему KPI, що охоплює не лише технічні або комерційні показники, а й екологічні, управлінські, соціальні та цифрові результати. Такий підхід дозволяє перейти від декларативної оцінки ефективності до вимірюваного управління результатами.

Основними ризиками впровадження є низька якість даних, недовіра учасників ринку, кіберризики, фінансова несталість, регуляторна невизна-

Таблиця 1

Концептуальна модель впровадження E-Waste платформи

Контур	Основне призначення	Очікуваний результат
Ринковий	Взаємодія утворювачів відходів та операторів	Прозорий пошук послуг і зменшення транзакційних витрат
Управлінський	Підтримка громад і органів влади	Дані для планування та управління
Аналітичний	Оброблення, візуалізація та інтерпретація даних	Підтримка рішень на основі доказів
Контрольний	Верифікація учасників і відстеження операцій	Зменшення ризиків нелегального поводження з відходами

Таблиця 2

Стейкхолдери та функціональна архітектура

Модуль	Функція	Значення
Реєстрація	Профілі утворювачів, операторів, громад і адміністраторів	Формування бази учасників
Верифікація	Перевірка ліцензій, дозволів, видів операцій та контактних даних	Зниження ризику недобросовісних контрагентів
GIS	Картування точок утворення, операторів, маршрутів і проблемних зон	Просторова аналітика та підтримка планування
Marketplace	Заявки, пропозиції, вибір виконавця, історія операцій	Прозора взаємодія попиту і пропозиції
Аналітика та звітність	Дашборди, KPI, візуалізація потоків, формування звітів	Підтримка управлінських рішень
API та мобільний застосунок	Обмін даними і оперативне залучення користувачів	Передумова масштабування

Таблиця 3

Поетапна модель впровадження та масштабування

Етап	Зміст	Основний результат
1. MVP	Базовий функціонал: реєстрація, оператори, заявки, GIS-мапа, первинна аналітика	Перевірка життєздатності продукту
2. Пілот	Запуск у вибраній громаді, місті або регіоні	Тестування з реальними користувачами
3. Регіональне масштабування	Підключення кількох громад, операторів і регіональних органів	Формування регіональної цифрової бази
4. Інтеграція	API-обмін, перевірка дозволів, інтеграція з офіційними реєстрами	Підвищення достовірності даних
5. Національна екосистема	Масове підключення користувачів, стандартизація даних, аналітичні панелі	Повноцінна цифрова інфраструктура
6. Розширені технології	AI-аналітика, прогнозування, ESG-звітність, автоматизований ризик-моніторинг	Поглиблена аналітика і стратегічне планування

Таблиця 4

KPI та ризики впровадження

Група KPI	Приклади показників	Управлінське значення
Операційні	кількість користувачів, операторів, заявок, завершених операцій, середній час пошуку оператора	Оцінка активності платформи
Екологічні	обсяг відходів, переданих ліцензованим операторам; кількість повідомлень про нелегальні місця	Оцінка екологічного ефекту
Управлінські	кількість підключених громад; кількість звітів; рішення, прийняті на основі даних	Оцінка користі для органів влади
Економічні	скорочення часу і витрат на пошук оператора; зростання замовлень для операторів	Оцінка ринкової ефективності
Соціальні та цифрові	звернення громадян, задоволеність користувачів, доступність системи, API-запити	Оцінка залучення та технологічної сталості

ченість, відсутність інтеграції з державними системами, низька цифрова готовність користувачів і фрагментація цифрових рішень. Управління цими ризиками має здійснюватися через верифікацію, модерацію, стандартизацію даних, кіберзахист, навчання користувачів, поетапне масштабування та API-інтеграцію.

Очікуваний ефект

Екологічний ефект платформи полягає у підвищенні простежуваності потоків відходів, зменшенні ризиків несанкціонованого видалення та покращенні доступу до ліцензованих операторів. Управлінський ефект проявляється у створенні аналітичної бази для громад і органів влади, мож-

ливості виявлення проблемних зон і планування інфраструктури. Економічний ефект пов'язаний зі зменшенням транзакційних витрат, підвищенням конкуренції та розвитком ринку екологічних послуг. Соціальний ефект полягає у залученні громадян до екологічного моніторингу, а інституційний – у підвищенні спроможності громад і державних органів працювати з даними.

Обговорення результатів. Отримані результати свідчать, що E-Waste платформа може стати перспективним інструментом модернізації системи управління відходами України, однак її ефективність залежить не лише від технічної реалізації, але й від здатності інтегруватися у ширший нормативний, інституційний, ринковий та управлінський контекст. Тому платформу доцільно розглядати не лише як цифровий продукт, але й як інструмент екологічного врядування, поєднуючи комунікаційну, аналітичну та контрольну функції.

Комунікаційна функція забезпечує взаємодію між утворювачами відходів та операторами. Аналітична функція пов'язана з накопиченням, структуруванням і візуалізацією даних щодо потоків відходів, заявок, географії попиту та проблемних територій. Контрольна функція проявляється у верифікації учасників ринку, перевірці їх правового статусу, фіксації операцій та зменшенні ризику залучення недобросовісних суб'єктів.

Особливо важливим є те, що платформа може стати проміжною ланкою між державними електронними системами та практичними потребами ринку. Державні системи виконують функції офіційного обліку, адміністрування і контролю. Натомість учасники ринку потребують гнучких інструментів: пошуку оператора, перевірки контрагента, розміщення заявки, геолокаційного відображення послуг і формування базової звітності. Саме цю нішу може зайняти E-Waste платформа, доповнюючи державну цифрову інфраструктуру.

Ключове обмеження – якість даних. У сфері відходів вони мають не лише інформаційне, а й регуляторне, екологічне та економічне значення. Недостовірні дані можуть призводити до прийняття помилкових управлінських рішень, викривлення ринку або втрати довіри. Тому платформа має передбачати верифікацію, модерацію, оновлення інформації, стандарти-

зацію форматів і подальшу інтеграцію з офіційними реєстрами.

Важливим є також GIS-компонент, який дозволяє фіксувати не лише наявність відходів або операторів, але й територіальну логіку їх розміщення, транспортну доступність, зони недостатнього покриття послугами та проблемні території. У цьому контексті GIS-модуль має значення не лише для бізнес-користувачів, але й для територіальних громад, які потребують інструментів просторового планування та моніторингу.

Водночас необхідно уникати надмірного технологічного оптимізму. Цифровий інструмент не замінює державну політику, інфраструктурні інвестиції, контроль, відповідальність операторів і екологічну культуру населення. Його ефективність можлива лише за умови поєднання з нормативними, інституційними, освітніми та економічними заходами. Тому E-Waste платформу слід розглядати як один із елементів ширшої трансформації управління відходами, а не як універсальне рішення для всіх проблем галузі.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження: формування цілісної методологічної моделі впровадження та масштабування цифрової E-Waste платформи як прикладного інструменту екологічного врядування, спрямованого на підвищення прозорості, простежуваності та керованості потоків відходів в Україні. На відміну від підходів, у яких цифрові рішення розглядаються як окремі інформаційні сервіси або комерційні marketplace-платформи, у статті E-Waste платформа обґрунтовується як багатофункціональний елемент цифрової екосистеми управління відходами. Запропонована чотириконтурна модель функціонування платформи поєднує ринковий, управлінський, аналітичний та контрольний контури; у поетапній моделі масштабування від MVP до національної цифрової екосистеми; у визначенні системи KPI для оцінки не лише технічної активності, але й екологічного, управлінського, економічного та соціального ефекту; у застосуванні ризик-орієнтованого підходу до цифрових платформ у сфері відходів; а також у розвитку GIS-орієнтованого бачення потоків відходів як просторово прив'язаних даних.

Практична значущість. Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованої методології для підготовки та реалі-

Таблиця 5

Наукова новизна

Елемент новизни	Сутність
Методологічний підхід	Платформа розглядається як елемент цифрової екосистеми екологічного врядування
Чотириконтурна модель	Поєднання ринкового, управлінського, аналітичного та контрольного контурів
Модель масштабування	MVP → пілот → регіональне масштабування → інтеграція → національна екосистема
KPI-система	Оцінка операційних, екологічних, управлінських, економічних, соціальних і цифрових результатів
Ризик-орієнтований підхід	Ідентифікація ризиків даних, довіри, кібербезпеки, фінансування та інтеграції

зації пілотних цифрових проєктів у сфері управління відходами. Вона може застосовуватися територіальними громадами для моніторингу потоків відходів, виявлення проблемних зон, оцінки доступності операторів та підготовки місцевих управлінських рішень. Для органів державної влади модель може бути корисною при формуванні політики цифровізації, визначенні стандартів даних і підходів до інтеграції прикладних платформ із державними електронними системами.

Для операторів управління відходами платформа створює прозорий канал доступу до клієнтів, можливість підтвердження правового статусу та формування репутаційного профілю. Для бізнесу та інших утворювачів відходів вона може спростити пошук належного оператора, перевірку дозвільних документів і зменшення комплаєнс-ризиків. Для громадськості платформа може стати інструментом участі в екологічному моніторингу щодо проблемних місць, а також підвищення екологічної обізнаності.

Для донорських організацій та інвесторів запропонована методологія може стати важливим чинником під час оцінки доцільності підтримки пілотних цифрових рішень. Наявність поетапної моделі, KPI та карти ризиків дозволяє структурувати грантові заявки, інвестиційні пропозиції та технічні завдання. Для IT-розробників функціональна архітектура може бути покладена в основу опису модулів, користувачьких ролей, вимог до GIS-компонента, аналітики, мобільного застосунку та API-інтеграції.

Висновки. У науковій праці обґрунтовано методологічні засади впровадження та масштабування цифрової E-Waste платформи у системі управління відходами України в контексті європейської інтегра-

ції. Встановлено, що цифровізація цієї сфери має розглядатися не лише як автоматизація окремих операцій, а як складова трансформації екологічного врядування, спрямована на прозорість, простежуваність і підвищення якості управлінських рішень.

Проведений аналіз засвідчив, що ключові виклики – це недостатня інтегрованість даних, обмежена взаємодія між утворювачами відходів та операторами, складність перевірки контрагентів, фрагментарність аналітики та ризики нелегального поводження з відходами. У таких умовах E-Waste платформа може виконувати роль прикладного цифрового інструменту, який забезпечує комунікацію, верифікацію, GIS-відображення, накопичення даних і підтримку рішень.

Запропоновано розглядати платформу як елемент цифрової екосистеми, що поєднує ринковий, управлінський, аналітичний та контрольний контури. Обґрунтовано поетапну модель її розвитку: MVP, пілотне впровадження, регіональне масштабування, інтеграція з державними системами та формування національної екосистеми. Означено функціональну архітектуру платформи, систему KPI, основні ризики та заходи управління ними.

Практичне значення запропонованої методології дозволяє її використання для підготовки пілотних проєктів, технічних завдань, грантових заявок, регіональних програм цифровізації, муніципальних екологічних ініціатив та систем моніторингу результатів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на апробацію моделі в конкретній громаді або регіоні, уточнення технічних вимог до модулів, оцінку економічної життєздатності та розроблення механізмів інтеграції з державними електронними системами.

Література

1. Про управління відходами : Закон України від 20.06.2022 р. № 2320-IX. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2320-20> (дата звернення: 28.05.2026).
2. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 р. № 1264-XII. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12> (дата звернення: 28.05.2026).
3. Про схвалення Національної стратегії управління відходами в Україні до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 820-р. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/820-2017-p> (дата звернення: 28.05.2026).
4. Про затвердження Національного плану управління відходами до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.02.2019 р. № 117-р. Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/117-2019-p> (дата звернення: 28.05.2026).
5. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives. EUR-Lex. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32008L0098> (date of access: 28.05.2026).
6. European Commission. A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. COM(2020) 98 final. Brussels, 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0098> (date of access: 28.05.2026).
7. European Commission. The European Green Deal. COM(2019) 640 final. Brussels, 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640> (date of access: 28.05.2026).
8. UNDP Ukraine. Digital Waste Management / E-Waste System. United Nations Development Programme in Ukraine. URL: <https://www.undp.org/ukraine/projects/digital-waste-management-e-waste-platform> (date of access: 28.05.2026).
9. Філін В. В., Улицький О. А., Фролов В. Ф. Innovative MVP product of the E-Waste platform on the Ukrainian market. Екологічна безпека та природокористування. 2026. № 1(57). С. 45-53. DOI: 10.32347/2411-4049.2026.1.45-53. URL: <https://es-journal.in.ua/article/view/358097> (дата звернення: 28.05.2026).
10. Ulytsky O. A., Filin V. V. Scientific approach to the creation and implementation of software in the field of waste management as an auxiliary applied tool in the process of implementing regulatory legal acts of the European Union. Геоінтеграція: наука, технології та довкілля : зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф. для студентів, аспірантів та молодих учених. Київ, 2025. С. 62-64. DOI: 10.15407/conference.geointegration.062. URL: https://www.igns.gov.ua/1_3-1-scientific-approach-to-the-creation-and-

implementation-of-software-in-the-field-of-waste-management-as-an-auxiliary-applied-tool-in-the-process-of-implementing-regulatory-legal-acts-of-the-europ/ (date of access: 28.05.2026).

11. UNITAR, ITU. Global E-waste Monitor 2024. Geneva ; Bonn : United Nations Institute for Training and Research ; International Telecommunication Union, 2024. URL: <https://ewastemonitor.info/> (date of access: 28.05.2026).
12. 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. 272 p.
13. Wilson D. C., Rodic L., Modak P., Soos R., Carpintero A., Velis K., Iyer M., Simonett O. Global Waste Management Outlook. Nairobi : UNEP ; ISWA, 2015. 346 p.
14. OECD. Digital Opportunities for Better Waste Management. Paris : OECD Publishing, 2019. 132 p.
15. Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. Ellen MacArthur Foundation, 2013. 96 p.
16. 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. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
17. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 114. P. 11-32. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
18. 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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
19. Kumar A., Holuszko M., Espinosa D. C. R. E-waste: an overview on generation, collection, legislation and recycling practices. Resources, Conservation and Recycling. 2017. Vol. 122. P. 32-42. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.01.018.
20. Kitchin R. The Data Revolution: Big Data, Open Data, Data Infrastructures and Their Consequences. London : SAGE Publications, 2014. 240 p.

Дата першого надходження статті до видання: 09.07.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 28.07.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 31.08.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бережняк Євгеній Михайлович (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри агроєкології та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-5945-1285;

Бизова Марина Борисівна (Одеса) – кандидат наук з державного управління, головна фахівчиня, Департамент екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації, orcid.org/0009-0008-7042-848X;

Білик Тетяна Іванівна (Київ) – доцент кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національний університет «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0009-0005-9271-9171;

Бобков Максим Олександрович (Житомир) – аспірант кафедри екології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0007-7238-9122;

Богданець В'ячеслав Анатолійович (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри геодезії та картографії, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0003-0051-1778;

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;

Бондарчук Наталія Валеріївна (Житомир) – кандидат юридичних наук, доцент, доцент кафедри права, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0001-8432-6275;

Бондарчук Юрій Володимирович (Житомир) – аспірант кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0008-7413-9968;

Бровко Дмитрій Юрійович (Київ) – аспірант кафедри екології агросфери та екологічного контролю, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0009-0007-0438-387X;

Бургаз Олексій Анатолійович (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент, завідувач кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0002-7363-8940;

Бутенко Олександр Григорійович (Одеса) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екологічної безпеки та гідравліки, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0001-6045-3106;

Буяльська Наталія Павлівна (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка», orcid.org/0000-0002-6800-5604;

Васютинська Катерина Анатоліївна (Одеса) – доктор технічних наук, доцент, завідувачка кафедрою екологічної безпеки та гідравліки, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0001-9800-1033;

Владимирова Олена Геннадіївна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0001-5114-6550;

Власюк Володимир Павлович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри лісового та садово-паркового господарства, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0001-6220-6280;

Внукова Наталія Володимирівна (Харків) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, orcid.org/0000-0002-4097-864X;

Вознюк Ярослав Юрійович (Київ) – аспірант кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний транспортний університет, orcid.org/0009-0003-3050-5333;

Войцицький Володимир Михайлович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-5641-0071;

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;

Гарабазій Тетяна Анатоліївна (Одеса) – старший викладач кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0002-8975-7143;

Гетьман Богдан Анатолійович (Київ) – аспірант кафедри хімії та екології, Український державний університет імені Михайла Драгоманова, orcid.org/0009-0003-4578-7513;

Гнєзділова Вікторія Ігорівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0000-0002-3340-5747;

Гончарук Віталій Володимирович (Умань) – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри біології та хімії, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-3977-3612;

Грабко Наталія Вікторівна (Одеса) – магістр екології, старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0003-1412-5683;

Гудзенко Володимир Миколайович (Київ) – доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник, Носівська селекційно-дослідна станція Миронівського інституту пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, науковий співробітник, Український інститут експертизи сортів рослин, orcid.org/0000-0002-9738-1203;

Гулай Віталій Володимирович (Кропивницький) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології, охорони навколишнього середовища та здорового способу життя, Центральнотехнічний національний технічний університет, orcid.org/0009-0009-5285-2102;

Даниленко Тетяна Миколаївна (Одеса) – студентка II курсу, Інститут медичної інженерії Національного університету «Одеська політехніка», orcid.org/0009-0001-1379-5864;

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;

Дмитрук Дмитро Олександрович (Житомир) – аспірант кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0006-6935-4124;

Добровольський Олександр Сергійович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, декан автомеханічного факультету, Національний транспортний університет, orcid.org/0000-0003-0048-1388;

Дубровський В'ячеслав Юрійович (Київ) – аспірант, Інститут агроєкології і природокористування Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0009-0008-3208-935X;

Дудченко Наталія Яківна (Київ) – старший науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-8283-5305;

Жозе Інасіу Ферран да Пайва Мартінш (Порту) – доктор філософії, факультет інженерії Університету Порту, orcid.org/0000-0002-9246-2565;

Залізняк Яна Іванівна (Умань) – доктор філософії, викладач кафедри екології, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-6497-1215;

Іващенко Ірина Вікторівна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри здоров'я фітоценозів і трофології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0003-1588-3718;

Ізабел О'Ніл Гайван (Віла Реал) – доктор філософії, Університет Траш-уш-Монтеш і Алту-Дору, Кінта-де-Прадуш, Фольядела, orcid.org/0000-0003-4461-7021;

Калин Богдана Миколаївна (Львів) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та захисту довкілля, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького, orcid.org/0000-0002-2230-5628;

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 Іван Платонович (Київ) – доктор географічних наук, професор, професор кафедри геодезії та картографії, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-2164-1259;

Коверсун Інна Вікторівна (Київ) – молодший науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-5760-505X;

Колісник Алла Вікторівна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0002-0622-9637;

Корнієнко Валентина Іванівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, директор Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0003-0403-7727;

Костенко Ігор Андрійович (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка», orcid.org/0000-0003-1195-5163;

Кратюк Олександр Леонідович (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри лісового та садово-паркового господарства, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0002-2661-8074;

Кубко Валентина Петрівна (Одеса) – кандидат філософських наук, доцент, доцент кафедри міжнародних відносин та права, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0003-0433-2013;

Кузьменко Євгеній Анатолійович (с. Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, завідувач лабораторії селекції ячменю, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-6256-1482;

Кутковий Денис Олегович (Харків) – здобувач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0009-0001-8722-8280;

Лоза Віталій Вікторович (Дніпро) – аспірант кафедри селекції і насінництва, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0009-0004-1473-6294;

Любимов Андрій Федорович (Київ) – завідувач Центру екологічної безпеки та управління відходами, Державна наукова установа Інститут екологічного відновлення та розвитку України, orcid.org/0009-0005-1586-3644;

Мазур Ольга Вікторівна (Вінниця) – доктор філософії з агрономії, старший викладач кафедри лісового та садово-паркового господарства, Вінницький національний аграрний університет, orcid.org/0000-0002-1763-7548;

Мандебура Святослав Васильович (Умань) – викладач кафедри біології та хімії, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0001-7952-5974;

Маслов Ігор Валерійович (Харків) – аспірант кафедри екології, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, orcid.org/0009-0008-6231-7739;

Маслова Наталя Михайлівна (Харків) – кандидат медичних наук, доцент, доцент кафедри фізіології, Харківський національний медичний університет, orcid.org/0000-0002-3828-9466;

Мельник Сергій Володимирович (Одеса) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екологічної безпеки та гідравліки, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0009-0002-5144-1212;

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології, лісівництва та сталого природокористування, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-3551-5085;

Морозова Тетяна Василівна (Київ) – доктор біологічних наук, доцент, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0003-4836-1035;

Мудрак Олександр Васильович (Вінниця) – доктор сільськогосподарських наук, професор, в.о. зав. кафедри екології, природничих та математичних наук, Комунальний заклад вищої освіти «Вінницька академія безперервної освіти», orcid.org/0000-0002-1776-6120;

Муха Роман Богданович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0009-0001-8372-7461;

Назаренко Микола Миколайович (Дніпро) – завідувач кафедри селекції і насінництва, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, orcid.org/0000-0002-6604-0123;

Некос Алла Наумівна (Харків) – доктор географічних наук, професор, професор кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи, Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, orcid.org/0000-0003-1852-0234;

Новікова Анастасія Миколаївна (Харків) – аспірант кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, orcid.org/0000-0003-4063-0130;

Озернюк Ганна Володимирівна (Одеса) – кандидат юридичних наук, доцент, доцент кафедри міжнародних відносин та права, Національний університет «Одеська політехніка», orcid.org/0000-0001-5030-6356;

Оліненченко Юрій Олександрович (Київ) – аспірант кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національний університет «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0009-0004-9384-8306;

Опенько Іван Анатолійович (Київ) – доктор економічних наук, професор, професор кафедри геодезії та картографії, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0003-2810-0778;

Орда Богдан Євгенович (Чернігів) – студент IV курсу, Навчально-науковий інститут природокористування та гуманітарних наук Національного університету «Чернігівська політехніка», orcid.org/0009-0003-0155-4195;

Панькевич Сергій Григорович (Луцьк) – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології, Луцький національний технічний університет, orcid.org/0000-0003-4807-4749;

Парахненко Владислав Геннадійович (Умань) – доктор філософії з наук про Землю, старший викладач кафедри екології, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-4312-6194;

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 Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0002-3158-3830;

Пірич Аліна Володимирівна (с. Центральне) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник відділу біотехнології, генетики і фізіології, Миронівський інститут пшениці імені В.М. Ремесла Національної академії аграрних наук України, orcid.org/0000-0003-2312-9774;

Піциль Андрій Орестович (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0002-0962-574X;

Пронь Ольга Сергіївна (Київ) – провідний фахівець факультету землевпорядкування, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0009-0006-6767-7595;

Рахметов Джамал Бахлулович (Київ) – доктор сільськогосподарських наук, професор, заступник директора з наукової роботи, завідувач відділу культурної флори, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України, orcid.org/0000-0001-7260-3263;

Риженко Наталія Олександрівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, старший науковий співробітник, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-1117-7544;

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;

Сакун Антоніна Олегівна (Харків) – доктор філософії, доцент, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0002-1079-7856;

Сімчук Андрій Павлович (Івано-Франківськ) – доктор біологічних наук, професор кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0000-0002-1762-144X;

Сіренко Артур Геннадійович (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук доцент кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0000-0003-2253-0937;

Терещенко Наталія Юріївна (Київ) – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник, доцентка кафедри загальної, органічної та фізичної хімії, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0003-0620-2888;

Тимошук Марина Олександрівна (Одеса) – старший викладач кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0002-1298-2393;

Тихенко Руслан Вікторович (Київ) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри управління земельними ресурсами, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-8716-1883;

Ткач Володимир Валентинович (Віла Реал) – кандидат хімічних наук, Університет Траш-уш-Монтеш і Алту-Дору, Кінта-де-Прадуш, Фольядела, orcid.org/0000-0001-7696-0954;

Ткачук Олександр Петрович (Вінниця) – доктор сільськогосподарських наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони навколишнього середовища, Вінницький національний аграрний університет, orcid.org/0000-0002-0647-6662;

Улицький Олег Андрійович (Київ) – доктор геологічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України», orcid.org/0000-0003-2674-2208;

Федонюк Віталіна Володимирівна (Луцьк) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Луцький національний технічний університет, orcid.org/0000-0002-1880-6710;

Філін Володимир Вікторович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0009-0007-0745-6181;

Фролов Валерій Федорович (Полтава) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри прикладної екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», orcid.org/0000-0003-1675-8476;

Хижняк Світлана Володимирівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, провідний науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-6745-2894;

Цибуля Сергій Дмитрович (Чернігів) – доктор технічних наук, професор, заступник директора, Навчально-науковий інститут інженерії, будівництва та виробництва Національного університету «Чернігівська політехніка», orcid.org/0000-0002-7843-6061;

Челябієва Вікторія Миколаївна (Чернігів) – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри харчових технологій та екології, Національний університет «Чернігівська політехніка», orcid.org/0000-0001-5364-4633;

Четвериков Віктор Валентинович (Київ) – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут газу Національної академії наук України, orcid.org/0000-0002-5069-4210;

Шевченко Олександр Вікторович (Київ) – доктор економічних наук, доцент, декан факультету землевпорядкування, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-1485-5646;

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;

Явнюк Андріан Андріанович (Київ) – доцент кафедри екології, хімії та хімічної технології, Національний університет «Київський авіаційний інститут», orcid.org/0000-0001-5986-1014.

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

4(67)

- *Екологічна безпека*
- *Екологічна безпека біорізноманіття*
- *Екологія атмосферного повітря*
- *Екологія земельних ресурсів*
- *Екологія водних ресурсів*
- *Екологія природних ресурсів*
- *Екологія екосистем*
- *Екологія територій смарагдової мережі*
- *Агроекологія*
- *Екологія урбанізованих екосистем*
- *Екологічний менеджмент*
- *Екологічне моделювання*
- *Теоретична екологія*
- *Моніторинг лісових екосистем*
- *Моніторинг екологічних наслідків воєнних дій*
- *Зміна клімату*
- *Управління відходами*

Адреса редакції:

Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корпус 2, Київ, 03035;
тел. +380 99 428 67 00;
www.ecoj.dea.kiev.ua
e-mail: info@ecoj.dea.kiev.ua

Видавничий дім «Гельветика»

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7623 від 22.06.2022 р.
Україна, 65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Тел. +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua

Дата розміщення онлайн – 31.08.2026 р.

Дата друку – 07.09.2026 р. Формат 64x84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.

Ум. друк. арк. 30,69. Тираж 100. Замовлення № 0826/665.

Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета