

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

МІНІСТЕРСТВО ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ ТА ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА ЕКОЛОГІЧНА АКАДЕМІЯ ПІСЛЯДИПЛОМНОЇ ОСВІТИ ТА УПРАВЛІННЯ

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

5(62) ЧАСТИНА 1



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. – К. :
Видавничий дім «Гельветика», 2025. – № 5(62). – Ч. 1. – 256 с.

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

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

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

Редакційна колегія:

Єрмаков В.М., доктор технічних наук

Івашенко Т.Г., доктор технічних наук

Коніщук В.В., доктор біологічних наук

Лукаш О.В., доктор біологічних наук

Машков В.А., доктор технічних наук (Чехія)

Нецветов М.В., доктор біологічних наук

Ольшевський С.В., доктор технічних наук

Риженко Н.О., доктор біологічних наук

Улицький О.А., доктор геологічних наук

Шматков Г.Г., доктор біологічних наук.

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

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Державний заклад «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління» (вул. Митрополита Василя Липківського, буд. 35, м. Київ, 03035, dei2005@ukr.net, тел. (044) 206-31-32).

На підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. (додаток 1) журнал внесений до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») у галузі біологічних наук (Е1 – Біологія та біохімія), природничих наук (Е2 – Екологія, Е4 – Науки про Землю) та технічних наук (Г2 – Технології захисту навколишнього середовища).

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

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

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

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

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ЕКОНОМІКА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ	7
Бондар О.І., Морозова Т.В., Ковган Я., Герасименко М. Орнітофауністичний моніторинг полонини руна як елемент екологічного обґрунтування розміщення вітроенергетичних установок.....	7
Боголюбов В.М., Клепко А.В., Бондарь В.І. Нові компетентності майбутніх фахівців у контексті переходу суспільства до сталого розвитку.....	13
Харченко В.В., Березовий В.Р. Нераціональне використанні річки Росі як приклад перешкод щодо впровадження цілі б сталого розвитку в Україні.....	16
ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ	25
Василенко О.М., Родіонова О.В. Сучасний гідрохімічний стан річки Гуйва: екологічна безпека та ризики для водокористування.....	25
Давибіда Л.І. Моделювання компонентів водного балансу басейну Дністра засобами ГІС.....	30
Карпенко Ю.О., Івусь Т.І. Роль стратегічної екологічної оцінки у формуванні стратегій розвитку територіальних громад Чернігівської області з урахуванням екологічного стану малих річок пониззя Десни.....	36
Крайнюков О.М., Щокіна М.М. Запровадження системи раннього попередження для оперативного виявлення забруднення водних об'єктів.....	41
Курило С.М., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Назаренко О.В. Ландшафтно-морфометричний аналіз водозбірних басейнів приток р. Тетерів на основі SRTM DEM.....	45
Новікова А.М., Мохонько В.І. Трансформація водних ресурсів та водозабезпечення населення України в умовах воєнно-техногенних загроз: виклики та стратегічні орієнтири для забезпечення сталого водопостачання.....	53
Приходько В.Ю., Ільїна А.О. Стандарти якості води в системах господарсько-питного водопостачання в Україні.....	60
Шахман І.О., Чвартковська А.О. Дослідження екологічного стану поверхневих вод р. Дніпро в межах Черкаського регіону.....	65
ЕКОЛОГІЯ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ	70
Босюк А.С., Себко К.В. Контроль електричних та температурних параметрів витяжки ґрунту імпедансним методом.....	70
Герасимюк П.В., Федоряк М.М. Зміни показників продуктивності та біологічної урожайності гібридів <i>Helianthus annuus</i> L. за різних умов запилення.....	76
ЕКОЛОГІЯ І ТРАНСПОРТ	84
Єгорова О.В., Чиж О.В., Волочай П.А. Оцінка впливу залізничного транспорту на екологічний стан ґрунтів прилеглих територій.....	84
Пічкур Т.В. Інвентаризація викидів забруднюючих речовин в атмосферу на підприємствах залізничного транспорту.....	92
ЕКОЛОГІЯ І БУДІВНИЦТВО	97
Зеленчук І.Д., Сонько С.П. Вплив будівельної діяльності на структурно-функціональні зв'язки між компонентами ландшафту.....	97
ЕКОЛОГІЯ І ВИРОБНИЦТВО	107
Волошин В.С., Бурко В.А. Про експериментальні підтвердження умов подолання принципу термодинамічної двоєдності як причини створення промислових відходів у технологічних процесах.....	107
Золотько О.В., Войтенко Ю.В., Русакова Т.І., Долженкова О.В., Назаренко Д.Ю. Аналіз показників екологічної безпеки впливу складально-зварювального виробництва металургійного підприємства на стан атмосферного повітря.....	114
Матухно О.В. Актуальний стан та декарбонізаційні виклики металургійної галузі України.....	122

Нагурський О.А., Брановський М.В. Аналіз екологічної ефективності капсульованих азотних добрив.....	130
Нагурський О.А., Марфугін А.Б. Технологія контролю та зменшення радону у виробництві будівельних виробів із радономісної сировини.....	136
Петровська М.А., Петровський С.В. Органічне виробництво як напрям «зеленої трансформації» сільського господарства України.....	141
ЕКОЛОГІЯ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ.....	148
Андріанова Т.В. Видовий склад та поширення в Україні сумчастих грибів на омелі звичайній (<i>Viscum album</i> : Santalaceae).....	148
Гаріджук С.В., Різничук Н.І. Морфологічна мінливість інтродукованої та природної популяції <i>Origanum vulgare</i> L. у Карпатському регіоні.....	163
Лучак І.П., Миленька М.М. Правове регулювання самосійних лісів в Україні: прогалини національного законодавства та міжнародні зобов'язання.....	168
Khomutinin Yu., Lazarev M., Levchuk S., Kosarchuk O., Illienko V., Lazarev D. The prospects of using natural meadows contaminated with ¹³⁷ Cs as a feed source for fattening young livestock.....	173
АГРОЕКОЛОГІЯ.....	181
Бондар Т.О., Шестопапов О.В., Босюк А.С., Сакун А.О., Нечипоренко Д.І., Бондар Т.В. Біоремедіаційне відновлення нафтозабруднених ґрунтів: експериментальне дослідження.....	181
Хижняк С.В., Корнієнко В.І., Самкова О.П., Мідик С.В., Коверсун І.В., Войціцький В.М. Основні підходи для комплексної оцінки забруднення ґрунтів внаслідок військових дій.....	189
Хохлов А.В., Хохлова Л.Й. Рослинний біоактивний композит для знешкодження токсичної дії гербіцидів у ґрунтах.....	195
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ.....	200
Бабенко В.М., Босюк А.С., Крючкова В.В. Методичні та практичні аспекти моніторингу стану лісосмуг в умовах впливу військових дій.....	200
Іващенко Т.Г., Печений В.Л., Яковлев І.О. Методологічні аспекти моніторингу якості водних ресурсів в умовах антропогенного навантаження.....	206
ЕКОЛОГІЯ І ТУРИСТИЧНА СФЕРА.....	210
Давидова І.В., Панасюк А.В., Демчук Л.І., Рекун І.А., Корбут М.Б. Туристичні карти як засіб промоції локальних туристичних ресурсів України.....	210
Сапко О.Ю. Досвід країн Європейського Союзу щодо розвитку сталого екологічного туризму.....	219
ЕКОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ В КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ.....	224
Bilokon A. Case studies towards energy transition in the EU, Switzerland, and Ukraine.....	224
Уваєва О.І., Шевчук Л.М., Алпатова О.М. Впровадження європейських стандартів щодо управління річковими басейнами в Україні у контексті стратегій охорони природи.....	234
ЕКОЛОГІЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ.....	240
Бусленко Л.В., Теплюк В.С. Біомоніторинг природних і антропогенних екосистем Волино-Поділля за участю ґрунтових тварин.....	240
ЕКОЛОГІЯ ТА ПОВОЄННИЙ РОЗВИТОК УКРАЇНИ.....	246
Гілета Л.А. Стратегічна екологічна оцінка – дієвий інструмент у повоєнному відновленні громад.....	246
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	251

CONTENTS

ECOLOGY AND ECONOMICS OF NATURAL RESOURCE USE	7
Bondar O., Morozova T., Kovhan Ya., Herasymenko M. Ornithofaunistic monitoring of the runa mountain meadow as a component of the environmental justification for wind energy facility placement.....	7
Bogoliubov V., Klepko A., Bondar V. New competencies of future professionals in the context of society’s transition to sustainable development.....	13
Kharchenko V., Berezovyi V. Irrational use of the Ros’ River as an example of obstacles to the implementation of goal 6 of the sustainable development in Ukraine.....	16
ECOLOGY OF WATER RESOURCES	25
Vasylenko O., Rodionova O. Current hydrochemical state of the Huyva river: ecological safety and risks for water use.....	25
Davybida L. Modeling the water balance components of the Dniester River basin using GIS tools	30
Karpenko Yu., Ivus T. The role of strategic environmental assessment in forming development strategies of territorial communities of Chernihiv region taking into account the ecological state of small rivers lower reaches of the Desna.....	36
Krainiukov O., Shchokina M. Implementation of an early warning system for the rapid detection of pollution of water bodies.....	41
Kurylo S., Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Nazarenko O. Landscape-morphometric analysis of catchment basins of the Teteriv River tributaries based on SRTM DEM.....	45
Novikova A., Mokhonko V. Transformation of water resources and water supply in Ukraine under war and technogenic threats: challenges and strategic guidelines for ensuring sustainable water provision.....	53
Prykhodko V., Ilina A. Water quality standards in municipal drinking water supply systems in Ukraine.....	60
Shakhman I., Chvartkovska A. Study of the ecological state of surface waters of the Dnipro River within the Cherkasky region	65
ECOLOGY OF LAND USE	70
Bosiuk A., Sebko K. Control of electrical and temperature parameters of soil extraction by the impedance method.....	70
Herasymiuk P., Fedoriak M. Changes in productivity parameters and biological yield of <i>Helianthus annuus</i> L. hybrids under different pollination conditions.....	76
ECOLOGY AND TRANSPORT	84
Yehorova O., Chyzh O., Volochai P. Environmental impact assessment of railway transport on the soil condition in adjacent areas.....	84
Pichkur T. Inventory of pollutant emissions into the atmosphere at railway transport enterprises.....	92
ECOLOGY AND CONSTRUCTION	97
Zelenchuk I., Sonko S. The impact of construction activity on the structural and functional relationships between landscape components.....	97
ECOLOGY AND PRODUCTION	107
Voloshyn V., Burko V. On experimental confirmation of the conditions for overcoming the principle of thermodynamic duality as the reason for the creation of industrial waste in technological processes.....	107
Zolotko O., Voitenko Yu., Rusakova T., Dolzhenkova O., Nazarenko D. Analysis of indicators of environmental safety of the impact on atmospheric air of the activities of assembly and welding production of a metalworking enterprise.....	114
Matukhno O. Current state and decarbonization challenges of Ukraine’s metallurgical industry.....	122
Nahurskyi O., Branovskyi M. Analysis of the ecological efficiency of encapsulated nitrogen fertilizers.....	130
Nahursky O., Marfutin A. Technology of radon control and reduction in the production of building products from radon-containing raw materials.....	136
Petrovska M., Petrovskiy S. Organic production as a direction of “green transformation” of agriculture in Ukraine.....	141

ECOLOGY OF NATURAL RESOURCES	148
Andrianova T. Species composition and distribution of ascomycetes on European mistletoe (<i>Viscum album</i> : Santalaceae) in Ukraine	148
Haridzhuk S., Riznychuk N. Morphological variability of introduced and natural populations of <i>Origanum vulgare</i> L. in the Carpathian region.....	163
Luchak I., Mylenka M. Legal regulation of spontaneous forests in Ukraine: gaps in national legislation and international obligations.....	168
Khomutinin Yu., Lazarev M., Levchuk S., Kosarchuk O., Illienko V., Lazarev D. The prospects of using natural meadows contaminated with ¹³⁷ Cs as a feed source for fattening young livestock.....	173
AGROECOLOGY	181
Bondar T., Shestopalov O., Bosiuk A., Sakun A., Nechyporenko D., Bondar T. Bioremediation of oil-contaminated soils: experimental study.....	181
Khyznyiak S., Kornienko V., Samkova O., Midyk S., Koversun I., Voitsitskiy V. Basic approaches for comprehensive assessment of soil pollution resulting from military actions.....	189
Khokhlov A., Khokhlova L. Plant bioactive composite for reducing the toxic effect of herbicides in the soils.....	195
ENVIRONMENTAL MONITORING	200
Babenko V., Bosiuk A., Kriuchkova V. Methodological and practical aspects of monitoring the condition of forest belts under the influence of military operations.....	200
Ivashchenko T., Pechenyi V., Yakovlev I. Methodological aspects of water resource quality monitoring under anthropogenic pressure.....	206
ECOLOGY AND TOURISM	210
Davydova I., Panasiuk A., Demchuk L., Rekun I., Korbut M. Tourist maps as a means of promoting local tourist resources of Ukraine.....	210
Sapko O. Experience of European union countries in the development of sustainable eco-tourism.....	219
ENVIRONMENTAL ISSUES IN THE CONTEXT OF UKRAINE'S EUROPEAN INTEGRATION	224
Bilokon A. Case studies towards energy transition in the EU, Switzerland, and Ukraine.....	224
Uvaieva O., Shevchuk L., Alpatova O. Implementation of European standards for river basin management in Ukraine in the context of nature conservation strategies	234
ECOLOGY OF BIODIVERSITY	240
Buslenko L., Tepluk V. Biomonitoring of natural and anthropogenic ecosystems of Volyn-Podillia with the participation of soil animals.....	240
ECOLOGY AND POST-WAR DEVELOPMENT OF UKRAINE	246
Gileta L. Strategic environmental assessment – an effective tool in post-war reconstruction of communities.....	246
AUTHORS' CREDENTIALS	251

ЕКОЛОГІЯ ТА ЕКОНОМІКА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

УДК 502.3:620.9(477.87) : 598.2

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.1>

ОРНІТОФАУНІСТИЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПОЛОНИНИ РУНА ЯК ЕЛЕМЕНТ ЕКОЛОГІЧНОГО ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗМІЩЕННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

Бондар О.І., Морозова Т.В., Ковган Я., Герасименко М.

Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України»
вул. Василя Липківського, 35/2, 02000, м. Київ
erdu@urk.net

У дослідженні представлено методологічні засади базових екологічних досліджень (baseline studies), що проводяться в межах оцінки впливу на довкілля (ОВД) та міжнародної екологічної й соціальної оцінки (ESIA) при проектуванні вітроенергетичних станцій (ВЕС) в Україні. Розглянуто підходи до вивчення основних груп фауни та флори, зокрема орнітофауни, рукокрилих, наземних безхребетних і рослинності. Для орнітофауни описано застосування стаціонарних спостережень з пунктів (vantage point method) та трансектних досліджень відповідно до рекомендацій NatureScot. Підкреслено роль моделі ризику зіткнення (collision risk model) як інструмента кількісного прогнозування впливу турбін на птахів. Методика дослідження рукокрилих базується на використанні ультразвукових детекторів і записуючих пристроїв, що дає змогу визначати видовий склад, активність і сезонну динаміку популяцій. Для оцінювання флори та інших груп тварин застосовується трансектно-пробний метод, який забезпечує репрезентативність охоплення території й дозволяє визначати структуру біотичних угруповань, ступінь антропогенної трансформації та наявність рідкісних видів. Особливу увагу приділено інтеграції результатів у геоінформаційні системи, що забезпечує моделювання потенційних зон конфлікту між вітротурбінами та біооб'єктами, оптимізацію розташування ВЕС й формування заходів з пом'якшення впливу на біорізноманіття. Запропонований підхід узгоджено з міжнародними стандартами екологічної оцінки та може бути використаний у практиці екологічного моніторингу, просторового планування та управління впливами на природні комплекси при розвитку відновлюваної енергетики. *Ключові слова:* базові дослідження, ESIA, EIA, вітроенергетика, птахи, кажани, біорізноманіття, ГІС-моделювання, модель ризику зіткнень, екологічний моніторинг, Україна.

Ornithofaunistic monitoring of the runa mountain meadow as a component of the environmental justification for wind energy facility placement. Bondar O., Morozova T., Kovhan Ya., Herasymenko M.

The article presents the methodological framework for baseline ecological studies conducted within Environmental and Social Impact Assessment (ESIA) and Environmental Impact Assessment (EIA) procedures for wind energy projects in Ukraine. It outlines the approaches applied to the investigation of key fauna and flora groups, including birds, bats, terrestrial invertebrates, and vegetation. For avifauna, the study employs stationary vantage point (VP) observations and transect surveys following NatureScot's recommended protocols. The vantage point method involves three-hour sessions of systematic species registration to support the development of collision risk models, which provide quantitative estimates of bird-turbine interaction probabilities. Bat surveys rely on ultrasonic detectors and acoustic recorders to identify species composition, temporal activity, and migration patterns. The assessment of flora and other faunal groups uses a transect-plot approach that ensures representative spatial coverage, enables the analysis of community structure, anthropogenic transformation, and the presence of rare or protected species. Special emphasis is placed on integrating collected data into Geographic Information Systems (GIS) for modeling potential conflict zones between wind turbines and biotic components, optimizing turbine placement, and designing mitigation measures to minimize biodiversity impacts. The proposed methodology is harmonized with international environmental standards (IFC, BirdLife, NatureScot) and can be applied in ecological monitoring, spatial planning, and sustainable management of natural complexes under the expansion of renewable energy infrastructure. *Key words:* baseline studies, ESIA, EIA, wind energy, birds, bats, biodiversity, GIS modeling, collision risk model, environmental monitoring, Ukraine.

Сучасні дослідження засвідчують, що розвиток вітроенергетики як ключового елементу енергетичної трансформації супроводжується багатомірним впливом на орнітофауну. Впливи вітрових електростанцій (ВЕС) класифікують на *прямі* та *непрямі* (рис. 1). Прямі наслідки проявляються у загибелі

птахів унаслідок колізій із лопатями турбін, тоді як непрямі стосуються витіснення, зміни поведінкових патернів, фрагментації та деградації гніздових і кормових біотопів. Узагальнення результатів численних метааналітичних досліджень підтверджує, що обидва типи впливів мають виражену видо- та популяцій-



Рис. 1. Впливи вітрових електростанцій на орнітофауну

но-специфічну дію, інтенсивність якої визначається ландшафтним контекстом, сезонною динамікою та таксономічними особливостями птахів [1, 2].

Оцінювання прямої смертності птахів від роботи ВЕС залишається предметом активної наукової дискусії. Узагальнені оцінки свідчать, що вітрова енергетика не є провідним чинником антропогенної смертності на глобальному рівні, однак локальні втрати можуть мати критичне значення для малочисельних і рідкісних популяцій. За даними *American Bird Conservancy* [3], щорічна смертність птахів унаслідок колізій із турбінами у США перевищує 500 тис. особин, а за прогнозами, до 2030 р. може сягнути понад 1,4 млн. Ці оцінки не враховують вторинних втрат, пов'язаних із функціонуванням супутньої інфраструктури – ліній електропередач, підстанцій і транспортних комунікацій [4].

Використання сучасних статистичних інструментів, зокрема моделі *GenEst*, дає змогу коригувати післябудівні оцінки смертності з урахуванням виживаності трупів і ефективності пошуку, підвищуючи точність прогнозів впливу ВЕС на демографічні показники видів. Водночас розвиток «чистої» енергетики, що сприяє зниженню викидів вуглецю, має стратегічне значення для збереження біорізноманіття, оскільки глобальна зміна клімату становить значно більшу загрозу для орнітофауни, ніж локальні техногенні ефекти [5].

Особливу увагу науковців привертає феномен витіснення (*displacement*), коли птахи уникають територій поблизу турбін або змінюють траєкторії польотів, що призводить до зниження щільності популяцій і втрати якісних місць існування навіть за відсутності масових колізій [6]. Цей ефект має особливе значення для високогірних екосистем Українських Карпат, де зосереджені унікальні природні комплекси та проходять ключові шляхи сезонних міграцій. Зокрема, у межах Полонини Руна (Закарпатська область) відсутність системного орнітологічного моніторингу на етапі попереднього екологічного аналізу підвищує ризик непередбачуваних змін у структурно-функціональній організації екосистем і чисельності окремих видів. Проведення річного багатосезонного моніторингу є необхідною умовою для виявлення потенційних зон ризику, оптимізації просторового планування та розроблення адаптивних природоохоронних заходів відповідно до принципів *Bird-Smart Wind Energy Program*.

Технічні параметри турбін, зокрема висота ротора та довжина лопатей, істотно впливають на вертикальну структуру ризику. Зі збільшенням висоти турбін змінюється висотний профіль потенційної смертності, що зумовлює різний ступінь уразливості для видів із відмінною типовою висотою польоту. Це підкреслює необхідність врахування технічних характеристик ВЕС у моделях екологічного ризику [7].

До ефективних методів мінімізації негативного впливу належать оптимальне розміщення турбін (*siting*), адаптивне керування їх роботою (*curtailment*) у періоди підвищеної орнітоактивності, а також застосування систем раннього виявлення птахів із використанням радарних і оптичних технологій. Емпіричні спостереження засвідчують, що інтеграція радарної детекції з оперативним відключенням турбін може знизити рівень смертності представників чутливих таксонів на 20–40 %, хоча ефективність таких систем потребує подальшої адаптації до умов складної орографії та мінливого мікроклімату [8].

Методологічні тенденції останніх років характеризуються впровадженням стандартизованих протоколів типу ВАСІ («До–Після–Контроль–Вплив»), розвитком просторових моделей ризику на основі ГІС-шарів, а також широким застосуванням багатосезонного моніторингу та статистичних методів корекції післябудівних оцінок. Ці підходи створюють основу для формування науково обґрунтованих сценаріїв розміщення ВЕС, особливо у вразливих природних регіонах.

У контексті гірських екосистем, зокрема Карпатського регіону та Полонини Руна, залишаються значні наукові прогалини. Переважна більшість емпіричних даних отримана для рівнинних або прибережних територій, що ускладнює екстраполяцію результатів на хребтові системи з унікальною вертикальною структурою польотів. Відсутність

локальних багатосезонних спостережень обмежує можливість прогнозування довгострокових демографічних наслідків, а також оцінювання ефективності заходів пом'якшення ризику в умовах складного гірського рельєфу [6].

Комплексний науково-інформаційний підхід, який поєднує багатосезонний орнітологічний моніторинг, ГІС-моделювання, ВАСІ-дизайн і адаптивне управління типу «радарна детекція + curtailment», формує основу для поєднання розвитку вітроенергетики з охороною орнітофауни. Такий підхід сприяє збереженню локальних популяцій і забезпеченню екологічної стабільності високогірних екосистем Полонина Руна [3].

Узагальнення наведених у таблиці 1 даних свідчить, що більшість емпіричних і метааналітичних досліджень акцентують на поведінкових та просторових ефектах вітроенергетики, які часто є не менш значущими, ніж безпосередня смертність. Так, у понад 60 % досліджень [9, 10] зафіксовано уникання птахами зон розміщення турбін, що зумовлює перерозподіл просторової активності видів на відстань до кількох кілометрів. Це, у свою чергу, призводить до фрагментації біотопів і втрати придатних місць існування, особливо для хижих та водоплавних видів.

Глобальні оцінки ризику [11] демонструють значну міжвидову диференціацію у сприйнятливості до колізій, при цьому найвищий рівень уразливості мають великі планерні види, зокрема. Яструбоподібні (*Accipitriformes*) Vieillot, 1816 та Соколоподібні

(*Falconiformes*) Sharpe, 1874. Дослідження у лісових та прибережних біотопах [12–14] підтверджують зниження чисельності птахів на відстані до 800 м від турбін, що вказує на ефект екологічної тіні – зону зниженого орнітологічного використання території.

Оцінювання ефективності технічних і поведінкових заходів мінімізації [16, 17] свідчить, що впровадження систем автоматичної детекції (*DTBird*) та адаптивного керування турбінами (*curtailment*) може знизити рівень колізій на 20–40 %. Однак ці підходи залишаються обмежено перевіреними в умовах складного гірського рельєфу, що зумовлює потребу у регіональних дослідженнях.

Таким чином, існуюча наукова база підтверджує комплексний характер впливів ВЕС на орнітофауну, але більшість робіт зосереджена на рівнинних і прибережних екосистемах Північної Америки та Західної Європи, тоді як дані щодо високогірних систем Карпатського регіону практично відсутні. Це створює істотну інформаційну прогалину, що унеможливорює об'єктивне прогнозування наслідків для таких територій, як Полонина Руна. Відповідно, проведення локального орнітофауністичного моніторингу із застосуванням стандартів ВАСІ, ГІС-моделювання та адаптивного менеджменту є не лише науково обґрунтованим, а й стратегічно важливим для розроблення екологічно збалансованих сценаріїв розвитку вітроенергетики у гірських регіонах України.

У цілому аналіз джерел засвідчує, що в сучасних умовах пріоритет набуває поєднання біомоніторин-

Таблиця 1

Короткий огляд основних досліджень впливу ВЕС на орнітофауну

Основний зміст дослідження	Ключові результати	
Метааналіз 84 досліджень із 22 країн щодо впливу турбін на птахів і ссавців.	У 63 % випадків зафіксовано уникання турбін; птахи змінюють маршрути на 1–5 км; визначено необхідність буферних зон	[9]
Систематичний огляд 71 роботи щодо ефектів витіснення птахів.	Витіснення зафіксовано у ~40 % випадків, особливо серед хижих і водоплавних птахів; запропоновано методологічні стандарти	[10]
Глобальна оцінка вразливості 362 видів птахів і 184 кажанів	Ідентифіковано 55 видів птахів із високим ризиком; запропоновано модель оцінювання ризику.	[11]
Вивчення ВЕС у лісових масивах Німеччини.	Чисельність птахів зменшилась на 24–41 % у зонах 500–800 м від турбін.	[12]
Польові дослідження прибережної орнітофауни.	Зниження видового багатства й зміна домінантної структури угруповань.	[13]
Оцінювання смертності птахів від турбін у різних ландшафтах.	Найвища смертність під час міграцій; рельєф впливає на ризик колізій	[14]
Аналітична доповідь про принципи екологічно безпечного розвитку ВЕС.	Визначено 7 принципів Bird-Smart Wind Energy для мінімізації впливу на птахів.	[3]
Аналіз поведінкових реакцій птахів поблизу турбін у Північній Європі.	Зміщення маршрутів польоту на 2–3 км; зменшення активності хижаків.	[15]
Статистичні моделі оцінки смертності птахів.	Модель GenEst враховує пошукову ефективність і втрати зразків, підвищує точність оцінок	[16]
Система автоматичного детектування птахів DTBird у США.	Автоматичне відключення турбін зменшило кількість зіткнень хижих птахів на 20–40 %.	[17]

гових спостережень, просторового моделювання та адаптивного управління природокористуванням, з урахуванням сезонної активності птахів, міграційних маршрутів і структури біотопів. Водночас для територій Українських Карпат спостерігається дефіцит регіональних емпіричних даних, що підкреслює наукову і практичну значущість дослідження орнітофауністичного моніторингу Полонини Руна у контексті планування вітроенергетичних об'єктів.

Методика дослідження основних груп фауни та флори для потреб міжнародної ESIA та ОВД об'єктів вітроенергетики. Дослідження біоти в межах процедур ESIA (Environmental and Social Impact Assessment) та ОВД (оцінки впливу на довкілля) є невід'ємною складовою оцінювання екологічної прийнятності проєктів будівництва вітроенергетичних установок. Метою таких досліджень є отримання репрезентативної інформації про поточний стан компонентів довкілля (baseline conditions), на основі якої здійснюється прогнозування потенційного впливу, моделювання ризиків і розроблення заходів із їхнього пом'якшення (IFC, 2023).

Просторові межі досліджень визначаються конфігурацією проєктної ділянки ВЕС і зоною потенційного впливу – зазвичай радіусом до 10 км від крайніх турбін для орнітологічних об'єктів і до 5 км для інших груп фауни. Польові роботи здійснюються у різні сезони року для фіксації сезонної мінливості біоти: період гніздування, міграційні шляхи, зимівля. Всі дослідження супроводжуються геопросторовим прив'язуванням точок спостереження (GPS/GIS) та фотофіксацією.

Дослідження орнітофауни здійснюється за комбінацією стаціонарних і трансектних методів, рекомендованих у документі *Recommended Bird Survey Methods to Inform Impact Assessment of Onshore Windfarms* (NatureScot, 2017) та адаптованих до умов України. Стаціонарні дослідження (Vantage Point Survey). На кожній дослідній ділянці визначаються пункти спостереження (VP – Vantage Points), з яких досвідчений орнітолог або бьордвотчер проводить спостереження за поведінкою та переміщенням птахів. *Тривалість однієї сесії:* близько 3 годин, переважно у ранкові та вечірні години активності. *Завдання:* фіксація видів, чисельності, напрямків польоту, висоти переміщення відносно запроєктованих рівнів турбін. *Результат:* на основі отриманих даних створюється модель ризику зіткнення (Collision Risk Model), яка дозволяє оцінити імовірну кількість випадків колізій птахів із лопатями ВЕС. *Додатково:* враховується поведінкова реакція птахів на присутність турбін (avoidance behavior) та інтенсивність використання території.

Трансектний метод передбачає систематичне обстеження території за визначеними маршрутами (лінійними або стрічковими трансектами), які охоплюють різноманітні біотопи в межах дослідної зони. *Завдання:* фіксація складу видів, чисельності,

структури угруповань, біотопічних переваг та просторового розподілу. *Методичні аспекти:* маршрути повторюються у різні сезони, що забезпечує порівнянність результатів і дає змогу простежити динаміку використання території птахами. *Вихідні дані:* відомості використовуються для картування ключових зон перебування (sensitivity mapping) і для оцінювання ризику кумулятивного впливу при розміщенні кількох ВЕС у регіоні.

Комплексний аналіз і прогнозування впливу. Отримані під час baseline-досліджень дані інтегруються у геоінформаційні системи (ГІС) для побудови карт розповсюдження видів, маршрутів міграцій та визначення зон екологічної чутливості. На основі цих даних розробляються: моделі впливу (для птахів – моделі колізій, для кажанів – моделі активності); карти просторового розподілу ризику; рекомендації щодо розміщення турбін, буферних зон і сезонних обмежень будівельних робіт.

Результати дослідження. Дослідження проводилися на території Полонини Руна (Закарпатська область) – високогірного масиву північно-західної частини Українських Карпат, що характеризується хвилястим рельєфом, чергуванням субальпійських лук, чагарникових формацій (*Juniperus communis*, *Vaccinium myrtillus*), фрагментів смереково-ялицевих лісів та гірсько-лучних екосистем. Висотний діапазон пунктів спостереження становив 900–1200 м н.р.м. Територія є відкритою для вітрових потоків, що зумовлює її придатність для розміщення вітроенергетичних установок. Антропогенне навантаження обмежується періодичним випасанням худоби та наявністю технічних доріг місцевого значення.

Польові спостереження здійснювалися в період 20–24 січня 2024 року, у рамках етапу базових (baseline) досліджень орнітофауни для оцінки можливого впливу майбутнього будівництва вітроенергетичних установок на птахів. Було визначено чотири стаціонарні пункти спостереження (VP – Vantage Point):

- **VP1:** 48°47'58.90"N, 22°48'36.88"E
- **VP2:** 48°47'16.00"N, 22°48'47.00"E
- **VP3:** 48°47'43.00"N, 22°47'25.00"E
- **VP4:** 48°46'50.00"N, 22°47'27.00"E

Кожен пункт охоплював зону огляду радіусом близько 1–2 км, що забезпечувало перехрещення секторів спостереження та повне покриття проєктної території. У кожному пункті проводилися щоденні трисгодинні сесії спостережень у ранкові (10:00–13:00) та післяобідні години (13:00–17:00). Загалом виконано 20 серій спостережень (по 5 днів для кожного пункту).

Метеорологічні умови спостережень. Упродовж періоду спостережень погодні умови залишалися стабільними, але характеризувалися низькою температурою, значною вітряністю та хмарністю, що істотно впливало на активність птахів (табл. 1).

Таблиця 2

Дата	Швидкість вітру, м/с	Напрямок	Хмарність, %	Опади	Видимість	Орнітологічна активність
20.01.2024	4–5	W	10	відсутні	>2 км	«Birds don't fly»
21.01.2024	2	SW	5–80	відсутні	1,5–2 км	«Birds don't fly»
22.01.2024	8	SW	5	відсутні	>2 км	«Birds don't fly»
23.01.2024	8	SW	100	відсутні	>2 км	«Birds don't fly»
24.01.2024	9	SW	100	відсутні	<1 км	«Birds don't fly»

У всі дні польових робіт було зафіксовано мінімальну або нульову активність птахів, що й позначено в польових журналах як “Birds don't fly”. Така ситуація є типовою для зимового періоду у високогірних районах Карпат, коли більшість видів перебувають на зимівлі у долинних ландшафтах або за межами регіону. Крім того, висока швидкість вітру (до 9 м/с) та низька температура створюють несприятливі умови для активного польоту птахів, особливо для дрібних горобцеподібних та денних хижаків.

Відсутність візуальних спостережень не свідчить про повну відсутність орнітофауни в межах території. Ймовірно, у теплий період року (весняна та осіння міграції) спостерігатиметься більша активність птахів, особливо у зв'язку з тим, що Полонина Руна розташована на периферії Східнокарпатського міграційного коридору.

Отримані дані є базовими (winter baseline) і можуть бути використані для моделювання сезон-

ної динаміки орнітофауни у подальших етапах досліджень. Зокрема, вони підтверджують, що зимовий період є малоризиковим щодо колізій птахів з ВЕУ, тому будівельні роботи можуть плануватися на цей час із мінімальним впливом на орнітофауністичні комплекси.

Висновки. Проведено серію спостережень у чотирьох пунктах (VP1–VP4) упродовж 20–24 січня 2024 р. Метеорологічні умови (висока вітрова активність, низька температура, значна хмарність) зумовили відсутність польотної активності птахів. Зимові дані можуть слугувати вихідним рівнем (baseline) для сезонного порівняння результатів у період весняних і осінніх міграцій. Територія досліджень характеризується низьким рівнем антропогенного навантаження, що робить її цінною моделлю для оцінювання природного стану високогірних луків у межах проекту ВЕС.

Література

- Kuvlesky W. P. Jr., Brennan L. A., Morrison M. L., Boydston K. K., Ballard B. M., Bryant F. C. Wind energy development and wildlife conservation: Challenges and opportunities. *Journal of Wildlife Management*. 2007. Vol. 71, № 8. P. 2487–2498. DOI: 10.2193/2007-248.
- Marques A. T., Drewitt L., Lloyd R. M. et al. Understanding bird collisions at wind farms: an updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*. 2014. Vol. 179. P. 40–52. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.08.017.
- American Bird Conservancy. *Bird-Smart Wind Energy: solutions for sustainable wind energy development*. Washington, D.C.: ABC, 2019. 21 p. [Електронний ресурс]. URL: <https://abcbirds.org/wp-content/uploads/2019/05/bird-smart-wind-energy.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
- Loss S. R., Will T., Marra P. P. Direct mortality of birds from anthropogenic causes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2015. Vol. 46. P. 99–120. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-112414-054133.
- MIT Climate Portal. Do wind turbines kill birds? 2024. URL: <https://climate.mit.edu/ask-mit/do-wind-turbines-kill-birds> (дата звернення: 01.11.2025).
- Marques A., Batalha H., Bernardino J. Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Birds*. 2021. Vol. 2, № 4. P. 460–475. DOI: 10.3390/birds2040034.
- Garvin J. C., Simonis J. L., Taylor J. L. Does size matter? Investigation of the effect of wind turbine size on bird and bat mortality. *Biological Conservation*. 2024. Vol. 291. P. 110474. DOI: 10.1016/j.biocon.2024.110474.
- International Finance Corporation (IFC), European Bank for Reconstruction and Development (EBRD), KfW Development Bank. *Post-Construction Bird and Bat Fatality Monitoring for Onshore Wind Energy Facilities in Emerging Market Countries: Good Practice Handbook and Decision Support Tool*. Washington, D.C.: IFC, 2023. URL: <https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2023/handbook-post-construction-bird-bat-fatality-monitoring-onshore-wind-ems.pdf> (дата звернення: 01.11.2025).
- Lucas M. et al. Wind turbines disturb two-thirds of bird and mammal groups studied worldwide. 2023. URL: <https://phys.org/news/2023-12-groups-birds-mammals-turbines.html> (дата звернення: 01.11.2025).
- Marques A. T. et al. Bird Displacement by Wind Turbines: Assessing Current Knowledge and Recommendations for Future Studies. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 5. P. 1221. DOI: 10.3390/en17051221.
- Thaxter C. et al. Bird and bat species' global vulnerability to collision with wind turbines. *BTO Research Report*. 2024. URL: <https://www.bto.org/our-work/science/publications/papers/bird-and-bat-species-global-vulnerability-collision> (дата звернення: 01.11.2025).
- Stienen E. et al. Wind turbines in managed forests partially displace common birds. *Forest Ecology and Management*. 2022. Vol. 523. P. 120–135. DOI: 10.1016/j.foreco.2022.120135.

13. Zhao X. et al. Impact of wind turbines on birds in the coastal area of Yancheng, Jiangsu, China. *Biodiversity Science*. 2022. Vol. 30, № 2. P. 216–228. DOI: 10.17520/biods.20220012.
14. De Lucas M. et al. Effects of wind farm location and configuration on bird mortality. *Biological Conservation*. 2018. Vol. 227. P. 263–272. DOI: 10.1016/j.biocon.2018.09.020.
15. May R. et al. Responses of birds to wind turbines in northern Europe. *Ecological Indicators*. 2020. Vol. 115. P. 106376. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106376.
16. Huso M. et al. Estimating bird mortality at wind energy facilities using GenEst. *Journal of Wildlife Management*. 2021. Vol. 85, № 3. P. 456–472. DOI: 10.1002/jwmg.22053.
17. Renewable Energy Wildlife Institute (REWI). *Technical Report: DTBird System Effectiveness at Reducing Bird Collisions at Wind Farms*. Washington, D.C.: REWI, 2024. URL: <https://www.dtbird.com/index.php/fr/hmea/item/187-rewi-technical-report-2024> (дата звернення: 01.11.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

НОВІ КОМПЕТЕНТНОСТІ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ У КОНТЕКСТІ ПЕРЕХОДУ СУСПІЛЬСТВА ДО СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Боголюбов В.М., Клепко А.В., Бондарь В.І.

Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ
volbog@ukr.net, alla.klepko@gmail.com, ndieco@ukr.net

Ідея статті полягає у розробці пропозицій в контексті змін у стандартах вищої освіти, щодо компетентностей, які включають знайомство з концепцією, принципами і Цілями сталого розвитку. В першу чергу це стосується таких галузей знань, як G «Інженерія, виробництво та будівництво» (зокрема G1 «Хімічні технології та інженерія», G3 «Електрична інженерія» тощо) та галузі знань D «Управління та адміністрування» (спеціальності D1 «Облік і оподаткування», «Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок» тощо) першого і другого рівнів вищої освіти. На думку авторів процес євроінтеграції викликав необхідність адаптації екологічного законодавства України до Європейських стандартів, зокрема, у відношенні досягнення Цілей сталого розвитку. Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України у жовтні 2024 року Стратегія звітності підприємствами із сталого розвитку певною мірою гармонізувала національне законодавство до вимог європейського¹. Більш того, директиви Європейського Союзу передбачають проведення кваліфікованого аудиту коректності таких звітів². З метою забезпечення якісного формування і аудиту звітів із сталого розвитку підприємства різних галузей повинні мати фахівців з відповідними компетентностями.

У статті проаналізовано компетентності, передбачені стандартами вищої освіти згаданих спеціальностей і запропоновано відповідні зміни до загальних та фахових компетентностей для кожної зі згаданих спеціальностей в контексті розуміння майбутніми фахівцями шляхів досягнення Цілей сталого розвитку. Зокрема, для спеціальності D1 освітнього рівня бакалавр загальну компетентність ЗК14 доповнити фразою «...та необхідність його сталого розвитку...». А для освітнього рівня магістр пропонуємо фахову компетентність СК06 доповнити виразом: «а також здатність оцінювати ефективність природоохоронних заходів та застосовуваних технологій для досягнення цілей сталого розвитку». *Ключові слова:* звіти підприємств, аудит, цілі сталого розвитку, стандарти вищої освіти, компетентності.

New competencies of future professionals in the context of society's transition to sustainable development. Bogoliubov V., Klepko A., Bondar V.

The idea of the article is to develop proposals for changes in higher education standards and competencies that include familiarity with the concept and principles of sustainable development. This primarily concerns such fields of knowledge as G “Engineering, Manufacturing and Construction” (in particular G1 “Chemical Technology and Engineering”, G3 “Electrical Engineering”, etc.) and the field of knowledge D “Management and Administration” (specialities D1 “Accounting and Taxation”, “Finance, Banking, Insurance and Stock Market”, etc.) of the first and second levels of higher education. In the authors' opinion, the process of European integration has necessitated the adaptation of Ukraine's environmental legislation to European standards, particularly with regard to the achievement of Sustainable Development Goals. Approved by a resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine in October 2024, the Strategy for Corporate Sustainability Reporting has, to a certain extent, harmonized national legislation with European requirements. Moreover, EU directives provide for a qualified audit of the accuracy of such reports. In order to ensure the high quality of the preparation and audit of sustainability reports, enterprises in various industries must have specialists with the relevant competencies.

The article analyses the competencies required by higher education standards for the above-mentioned specialities and proposes appropriate changes to the general and professional competencies for each speciality in the context of future specialists' understanding of how to achieve the Sustainable Development Goals. In particular, for speciality D1 at the bachelor's level, general competency ZK14 should be supplemented with the phrase “...and the need for its sustainable development...”. And for the master's degree, we propose to supplement the professional competence SK06 with the phrase: “... as well as the ability to assess the effectiveness of environmental protection measures and technologies used to achieve sustainable development goals.” *Key words:* company reports, audit, sustainable development goals, higher education standards, competence.

Постановка проблеми. В рамках процесу євроінтеграції Кабінет Міністрів України в жовтні 2024 року видав Розпорядження «Про схвалення Стратегії запровадження підприємствами звітності із сталого розвитку» (далі Стратегія) [1]. Стратегія зобов'язує державні органи (за переліком) проводити щорічний моніторинг виконання підприєм-

ствами таких звітів. Виконання і аудит таких звітів має сприяти «доступу українських підприємств до міжнародних ринків капіталу та залученню іноземних інвестицій». Стратегія визначає єдині методологічні засади реалізації державної політики України у сфері звітування із сталого розвитку підприємств, відповідно до директив і регламентів, прийнятих у державах – членах ЄС.

Директивами ЄС про корпоративну звітність зі сталого розвитку заплановано поетапне застосу-

¹ Розпорядження КМУ від 18 жовтня 2024 р. № 1015-р.

² Директива ЄС про корпоративну звітність зі сталого розвитку (CSRD).

вання стандартів ESRS³ звітності зі сталого розвитку протягом 2024–2028 років [2]. При цьому, підприємства, де більше 500 працівників, надають звітність у 2025 році за 2024 рік, менші підприємства – у 2027 році за 2026 рік, а підприємства країн, не членів ЄС – у 2029 році за 2028 рік [3]. Європейські стандарти звітності із сталого розвитку (ESRS) визначають порядок розкриття інформації за такими напрямками:

екологічний аспект – пом'якшення наслідків зміни клімату (показники досягнення Цілі 13), забруднення водних ресурсів (показники досягнення Цілі 6), використання ресурсів та економіка замкнутого циклу (показники досягнення Цілей 11 і 12), біорізноманіття та екосистеми (показники досягнення Цілей 14 і 15);

соціальний аспект – рівні можливості для всіх (показники досягнення Цілей 5 і 10), умови праці (показники досягнення Цілі 8), повага до прав людини (показники досягнення Цілі 16);

управлінський аспект – роль органів управління та нагляду на підприємстві (показники досягнення Цілей 8 і 9); ділова етика та корпоративна культура (показники досягнення Цілей 8 і 10); управління та якість відносин із діловими партнерами (показники досягнення Цілі 17); системи внутрішнього контролю та управління ризиками (показники досягнення Цілей 8 і 16).

Шляхи впровадження стандартів ESRS в Україні зараз активно дискутуються в наукових та громадських екологічних колах, зокрема, щодо змісту інформації у звітах про сталий розвиток [4, 5]. На сьогодні з ESG-факторів є невід'ємною частиною фінансової звітності підприємства. Більше того, звітність з ESG розглядається як глобальний тренд, який створює допуск на ринки ЄС, забезпечує спрощення отримання кредитів та розширює можливості співпраці з міжнародними партнерами [6]. Наголошується, що звіт про сталий розвиток за європейськими стандартами ESRS є частиною звіту з управління, який для спрощення автоматизованого аналізу і контролю складатиметься в електронному форматі.

Професори Крутова А.С. і Нестеренко О.О., запропонували структуру інституціональної моделі інформаційного забезпечення оцінювання внеску підприємств в досягнення цілей сталого розвитку [7]. Щоб врахувати більш широкий діапазон показників, які характеризують всі аспекти стандарту ESG, запропоновано використовувати окремі індикатори досягнення 17-ти ЦСР, адаптованих для України з акцентом на індикатор 16.1.

Актуальність досліджень. Статус України, як кандидата в члени в ЄС, спонукає уряд до змін законодавства, зокрема, згідно з Європейськими стандартами звітності із сталого розвитку (ESRS). Операційний план реалізації Стратегії передбачає

поетапне запровадження підприємствами звітності зі сталого розвитку протягом 2024–2026 років шляхом досягнення двох Стратегічних цілей [8]. Перша Стратегічна ціль передбачає запровадження складення, подання та оприлюднення підприємствами звітності із сталого розвитку, а друга Стратегічна ціль запроваджує процедуру аудиту звітності підприємств із сталого розвитку. Євроінтеграційні процеси вимагають змін не тільки в стандартах екологів, а і в стандартах підготовки економістів-аудиторів та фінансових менеджерів з метою оцінювання діяльності підприємств в контексті принципів переходу суспільства до сталого розвитку.

Результати досліджень. При схваленні Стратегії щодо звітності підприємств із сталого розвитку КМУ затвердив операційний план реалізації Стратегії, яким центральні органи виконавчої влади повинні забезпечувати його своєчасне виконання [8]. Міністерство фінансів, зокрема, має забезпечити розроблення до 1 грудня 2026 р. проекту заходів з реалізації Стратегії у 2027–2030 роках. Важливо відмітити, що працівники підприємства «для належного звітування із сталого розвитку» і аудитори, які надаватимуть послуги щодо аудиту такої звітності, повинні мати відповідні професійні компетентності.

Для імплементації вимог європейського законодавства щодо звітування із сталого розвитку було запропоновано проект змін до Закону України «Про аудит фінансової звітності та аудиторську діяльність» [9]. Запропоновані цим проектом зміни мають забезпечити «надання впевненості щодо звітності із сталого розвитку». Щоб забезпечити впевненість у коректності «звітності із сталого розвитку» вводяться вимоги до «аудитора із сталого розвитку», тобто це має бути «аудитор, який підтвердив кваліфікаційну придатність до надання впевненості щодо звітності із сталого розвитку». На наш погляд це мають бути фахівці з вищою освітою другого рівня (магістерського) в галузі знань D «Управління та адміністрування» (зокрема, спеціальності D1 «Облік і оподаткування», «Фінанси, банківська справа, страхування та фондовий ринок» тощо). Аналіз стандартів вищої освіти для цих спеціальностей показує, що вони потребують деяких змін для набуття розуміння майбутніми фахівцями шляхів досягнення Цілей сталого розвитку. Так, для спеціальності D1 освітнього рівня бакалавр загальну компетентність ЗК14 доповнити фразою «...та необхідність його сталого розвитку...». А для освітнього рівня магістр пропонуємо фахову компетентність СК06 доповнити виразом: «а також здатність оцінювати ефективність природоохоронних заходів та застосовуваних технологій для досягнення цілей сталого розвитку».

З іншого боку, змінюються професійні вимоги до працівників підприємств, які готуватимуть звіти зі сталого розвитку. Проведено аналіз фахових компетентностей в стандартах вищої освіти підготовки фахівців першого і другого рівнів вищої освіти

³ ESRS – European Sustainability Reporting Standards

галузей знань Е «Природничі науки, математика та статистика» (спеціальність Е2 «Екологія») і G «Інженерія, виробництво та будівництво» (спеціальність G2 «Технології захисту навколишнього середовища»). Можна стверджувати, що випускники цих спеціальностей усвідомлюють необхідність переходу суспільства до сталого розвитку, мають здатність оцінювати вплив об'єктів господарської діяльності на довкілля і можуть якісно формувати звіти підприємств із сталого розвитку.

Висновки.

1. На основі аналізу наукових публікацій та нормативно-правових актів акцентовано увагу на основних проблемах, що впливають на процес зві-

тування із сталого розвитку – як відсутність кваліфікованих працівників на підприємствах різних галузей, так і відсутність аудиторів з компетентностями в галузі сталого розвитку.

2. Визначено пріоритетні напрямки вдосконалення стандартів вищої освіти, зокрема, для спеціальності D1 освітнього рівня бакалавр загальну компетентність ЗК14 доповнити фразою «...та необхідність його сталого розвитку...». Для освітнього рівня магістр доцільно, на наш погляд, фахову компетентність СК06 має бути доповнена «здатністю оцінювати ефективність природоохоронних заходів та застосовуваних технологій для досягнення цілей сталого розвитку».

Література

1. Про схвалення Стратегії запровадження підприємствами звітності із сталого розвитку. Розпорядження КМУ від 18 жовтня 2024 р. № 1015-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1015-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 18.10.2025).
2. Директива ЄС про корпоративну звітність зі сталого розвитку (CSRD). URL: <https://www.pwc.com/ua/uk/services/csrd.html> (дата звернення: 18.10.2025).
3. Безверхий К. Впровадження європейських стандартів звітування про сталий розвиток. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*. 133, 2 (квітень 2024), 134–150. DOI: [https://doi.org/10.31617/3.2024\(133\)08](https://doi.org/10.31617/3.2024(133)08).
4. *Актуальні питання впровадження ESG-оцінки підприємств в Україні*. URL: https://www.savednipro.org/esg_17062025/ (дата звернення: 08.10.2025).
5. Звітування про сталий розвиток в ЄС і в Україні: Інформ. центр «Зелене досьє». URL: <https://www.dossier.org.ua/wp-content/uploads/2025/06/Sustainability-reporting.pdf> (дата звернення: 08.10.2025).
6. Звітність зі сталого розвитку: нові вимоги в Україні. URL: factor.academy/blog/zvitnist-zi-stalogo-rozvitku-novi-vimogi-v-ukrayini-2/. (дата звернення: 25.10.2025).
7. Крутова А.С., Нестеренко О.О. Інституціональна модель інформаційного забезпечення оцінки внеску корпоративного сектору в досягнення цілей сталого розвитку. URL: https://finukr.org.ua/docs/FU_19_11_044_uk.pdf. (дата звернення: 14.08.2025).
8. Операційний план реалізації у 2024-2026 роках Стратегії запровадження підприємствами звітності із сталого розвитку. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1015-2024-%D1%80#n125> (дата звернення: 26.10.2025).
9. Проект Закону про внесення змін до Закону України «Про аудит фінансової звітності та аудиторську діяльність» та деяких законів України щодо удосконалення законодавства у сфері аудиторської діяльності. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billinfo/Bills/pubFilezip/3074180> (дата звернення: 28.10.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 504.062

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.3>

НЕРАЦІОНАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ РІЧКИ РОСІ ЯК ПРИКЛАД ПЕРЕШКОД ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ ЦІЛІ 6 СТАЛОГО РОЗВИТКУ В УКРАЇНІ

Харченко В.В.¹, Березовий В.Р.²¹Національний університет харчових технологій

вул. Володимирська, 68, 01033, м. Київ

²Громадська організація «Хорти Буслава»

вул. Богуславка, 34, 09701, м. Богуслав

graf_geo_ua@yahoo.co.uk, elvlas@ukr.net

Ціль 6 сталого розвитку – «Чиста вода та належні санітарні умови» («забезпечення наявності та сталого управління водними ресурсами та санітарією»). Охорона, раціональне використання та відновлення водних ресурсів є актуальним завданням для України, особливо в умовах ведення проти нас повномасштабної війни. У представленій статті розглядаються виклики та перешкоди на шляху до досягнення сталого використання водних ресурсів річки Росі. Досягнення вказаної цілі 6 має означати покращення роботи підприємств, що є водокористувачами (каналізаційні очисні споруди, гідроелектростанції тощо), таким чином, щоб мінімізувати їх негативний вплив на екостан Росі. А це у свою чергу має забезпечити належну якість води для потреб водопостачання, меліорації, туризму та рекреації. Як один із важливих розглядається чинник форми власності (державна чи приватна) підприємств, які використовують воду з річки Росі. А саме – як та чи інша форма власності спонукає підприємства дбайливіше використовувати водні ресурси. Оцінюється дієвість наявних механізмів впливу на порушників законодавства України у сфері охорони навколишнього середовища. У 2022 році було створено та підписано петицію до президента України [5] «Про розробку та здійснення проекту щодо порятунку річки Рось з подальшим використанням його для відновлення водності всіх рік України та їх приток – малих річок». Наша держава має офіційний статус кандидата на вступ до Європейського Союзу і має дотримуватися стандартів ЄС, зокрема – щодо охорони, раціонального використання й відновлення річкових екосистем. Насамперед це стосується найвразливіших комплексів – екосистем малих і середніх річок. Тому дослідження річки Росі є актуальним завданням. *Ключові слова:* річка Рось, ГЕС, очисні споруди, ціль 6 сталого розвитку, управління водними ресурсами.

Irrational use of the Ros' River as an example of obstacles to the implementation of goal 6 of the sustainable development in Ukraine. Kharchenko V., Berezovyi V.

Goal 6 of the sustainable development is “Clean water and sanitation” (“Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all”). Protection, sustainable use and restoration of water resources are urgent tasks for Ukraine, especially in the conditions of a full-scale war. The paper considers challenges and obstacles on the way to achieving sustainable use of water resources of the Ros' River. Achieving goal 6 should mean improving the work of water-using enterprises (sewage treatment facilities, hydroelectric power plants, etc.) in such a way as to minimize their negative impact on the ecological state of the Ros', which in turn should ensure the proper quality of water for water supply, land reclamation, and tourism and recreation. The form of ownership (state or private) of enterprises that use water from the Ros' River is considered an important factor – how this or that form of ownership encourages enterprises to use water resources more carefully. The effectiveness of existing mechanisms of influence on violators of Ukrainian legislation in the field of environmental protection is evaluated. In 2022 the special petition to the President of Ukraine was created and signed. It was called “About the development and implementation of a project to save the Ros' River with its further use to restore the water supply of all rivers of Ukraine and their tributaries – small rivers.” Our country is a candidate for joining the European Union and must comply with EU standards, in particular, regarding the protection, rational use and restoration of river ecosystems. This especially applies to the most vulnerable ecosystems of small and medium-sized rivers. Therefore, the research of Ros' River is a relevant task. *Key words:* Ros' River, HPP, sewage treatment facilities, goal 6 of the sustainable development, water resources management.

Постановка проблеми та її актуальність.

Вода – єдина речовина, яка критично необхідна для життя. А найважливішою потребою для здоров'я та добробуту людини є доступ до чистої води – належної якості за санітарними й гігієнічними характеристиками.

Порядком денним щодо сталого розвитку до 2030 року, який був схвалений усіма членами ООН у 2015 році, було затверджено 17 глобальних цілей сталого розвитку (ЦСР). Означені цілі є терміновим закликком до дій усіх країн – розвинених і тих, що роз-

виваються, – у глобальному партнерстві [20] Ціль 6 сталого розвитку проголошує важливість надання кожній людині доступу до чистої води та належних санітарних умов. Така ціль містить 8 завдань, які мають бути реалізовані до 2030 року, охоплюючи основні сфери водопостачання і санітарії та сталого управління водними ресурсами. Але значних успіхів у досягненні цілей поки нема.

Звіт щодо прогресу реалізації ЦСР за 2024 рік [19] щодо Цілі 6 вказує: жодне із завдань ЦСР 6 поки не вдається виконати. Глобальний прогрес у впро-

вадженні інтегрованого управління водними ресурсами лишається повільним – 49 % у 2017 році, 54 % у 2020 році, 57 % у 2023 році. Тож досягти цілі до 2030 року (91 %) не видається здійсненним. Між 2005 і 2022 роками у світі спостерігалось збільшення частки поверхневих вод, що здебільшого стало результатом зміни клімату та наповнення водосховищ. Країни, які впроваджують наймасштабніші програми моніторингу, показують, що якість води погіршується з 2017 року [19]. Таке наповнення водосховищ із низьким прогресом впровадження інтегрованого управління водними ресурсами та погіршенням якості води характерне для р. Росі.

Україна посідає 32 місце серед 40 за забезпеченістю питною водою в Європі та входить до списку країн, яким загрожує дефіцит води. При цьому 75 % води, що подається споживачам, забирається з поверхневих джерел – річок. Існуючі проблеми із застарілими станціями водопостачання та очисними спорудами, які не можуть впоратися з поточними навантаженнями та не відповідають сучасним вимогам щодо очищення води та стоків, посилилися руйнуванням та пошкодженням водної інфраструктури, спричиненими повномасштабною війною [21]. Лише за перший рік повномасштабної війни втрати у сфері водопостачання та водовідведення внаслідок ведення бойових дій на території України оцінено приблизно у 7,5 млрд доларів США [23]. Такі втрати – дуже відчутні для України.

Україна належить до країн з недостатніми запасами водних ресурсів і є однією з найменш забезпечених водою країн Європи. Річкова мережа України не густа (середнє значення становить $0,34 \text{ км/км}^2$),

великих природних водойм немає, запасів підземних вод – мало. Питома забезпеченість річкового стоку України становить близько 1000 м^3 на одну людину на рік, що в 2,5 рази менше, ніж у Швеції чи Німеччині, у 3,5 рази менше, ніж у Франції, та в 5 разів менше, ніж у Великій Британії. Згідно з останнім звітом Світового банку, Україна знаходиться десь між Чадом і Суданом за рівнем питного водопостачання [15]. Тому охорона, раціональне сталє використання і відновлення водних ресурсів і річкових екосистем на сьогодні є дуже актуальним завданням для України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Автори проаналізували відкриті дані про підприємства, які завдають найбільшої шкоди екосистемам річки Росі (ГЕС та очисні споруди), форми власності водокористувачів, а також прецеденти порушення ними природоохоронного законодавства України і реакцію органів державної влади на означені правопорушення. Важливі об'єкти представленого дослідження – Стеблівська ГЕС (належить ЗЕД «Новосвіт», ЄДРПОУ 30594406) і каналізаційні очисні споруди (КОС) міста Білої Церкви (належить ТОВ «Білоцерківвода», ЄДРПОУ 38010130). Опрацювання географічно координованих даних здійснено із використанням ГІС *MapInfo Professional*.

Рось є правою притокою найбільшої річки України – Дніпра. Довжина Росі становить майже 350 км, а площа її водозбірного басейну – близько 13 тисяч квадратних кілометрів (рис. 1).

$13\,000 \text{ км}^2$ – це менше 4,5 % від загальної площі басейну Дніпра в Україні, але майже дорівнює території Чорногорії.



Рис. 1. Басейн річки Росі на мапі України

Виконано за допомогою GIS *MapInfo Professional* на основі [11]

Рось – річка, яка переважно протікає на Придніпровській височині, у межах Вінницької, Київської та Черкаської областей України [1] Басейн річки також частково охоплює Житомирську область. Карту басейну р. Росі представлено на рис. 2.

Аналіз топографічних карт М-35-95 та М-36-98 [6] показує, що падіння Росі (перепад висот між витоком і гирлом) складає 204 м. Важливою для розвитку гідроенергетики характеристикою річки є її *похил* – відношення падіння до загальної довжини водотоку. Похил Росі становить майже 0,6 м/км, за рахунок її розташування здебільшого на височині. Похил р. Дніпра, наприклад, становить лише 0,11 м/км [16].

Основними екологічними проблемами щодо річки Росі є [14]: надмірне регулювання стоку, забруднення стічними водами, розорювання берегів.

Рось є джерелом водопостачання побутових і промислових споживачів, об'єктом рекреації та туризму для кількох регіонів України. Водночас річці притаманна низка екологічних проблем, тому вона перебуває в центрі уваги природоохоронців. Рось – придатний приклад для дослідження перешкод і викликів на шляху реалізації *Цілі 6 сталого розвитку*. Крім того, проблема екостану річки Росі нині перебуває в центрі особливої уваги Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України [9].

Мета статті – висвітлення основних аспектів і причин нераціонального використання гідроресурсів річки Росі, окреслення на прикладі об'єктної річки перешкод щодо впровадження *цілі 6 сталого розвитку* й опрацювання шляхів подолання таких перешкод.

Виклад основного матеріалу дослідження. Підприємства, які завдають найбільшої шкоди водним ресурсам р. Росі, є приватними компаніями.

Стеблівська ГЕС. Стеблівська ГЕС (рис. 2, 3), є найшкідливішою ГЕС для Росі. Вона майже повністю перекриває течію річки, спричиняючи максимальну евтрофікацію. Поки станція перебувала в оренді, але все ще у державній власності, орендар забезпечував постійні безперебійний ековитрати води через греблю не менше 2,4 м³/с (рис. 3а), таким чином дотримуючись вимог природоохоронного законодавства. Ековитрати воли було припинено у 2015 році власником ГЕС після її приватизації (рис. 3б).

Конструкція турбін означеної гідроелектростанції забезпечує виробництво електроенергії при відносно значних витратах води. Нині приток води до водосховища дає змогу працювати Стеблівській ГЕС не більше 4-5 годин на добу. Решту часу вона має забезпечувати безперервні ековитрати води, але не робить цього. Ні штрафи, ні суди не змусили власника повернути витрати води до нормального значення. Порушення гідрорежиму р. Росі та її водосховищ власником Стеблівської ГЕС детальніше описано першим співавтором в окремій статті [2, с. 364], а також іншими авторами [10].

Істотні перекриття течії Росі призводять до падіння рівня розчиненого кисню і в Стеблівському водосховищі, і нижче за течією. Наслідком є загибель водних біоресурсів. Випадки падіння кисню нижче мінімального значення в 4 мг/дм³ зафіксувала громадська організація «Сейв Рось» (рис. 4).

Такі падіння рівня кисню зазвичай є короточасними випадками, тому вони не відображені в усереднених (середньомісячних) даних державних лабораторій [8], що показано на рис. 5. Та навіть кількогодінне падіння O₂ може призвести

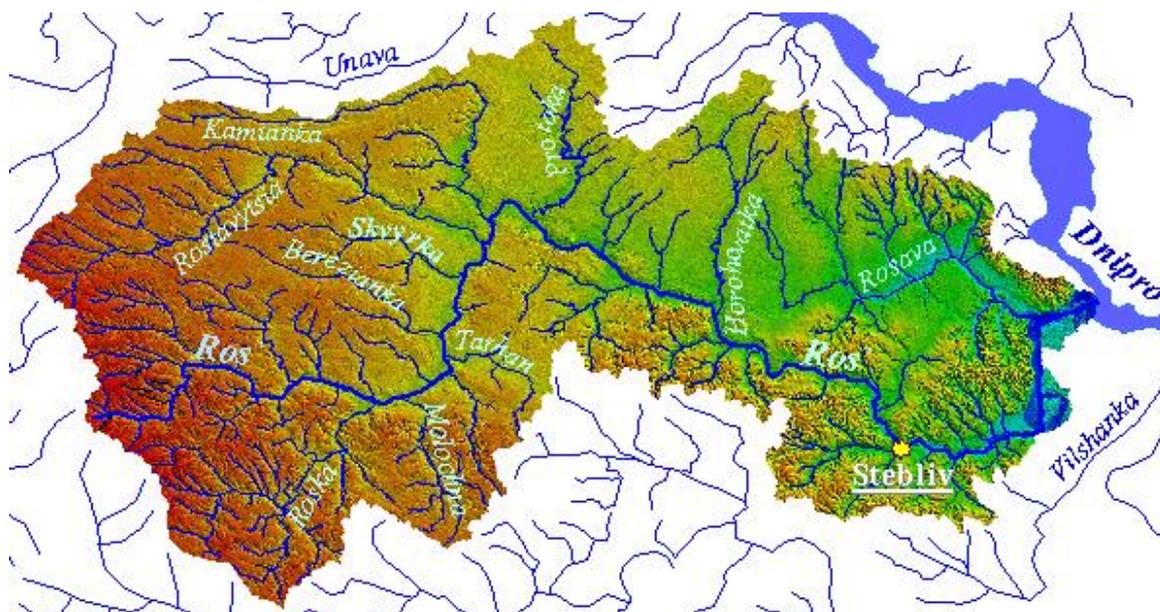


Рис. 2. Басейн і річкова система річки Росі

Виконано за допомогою GIS MapInfo Professional

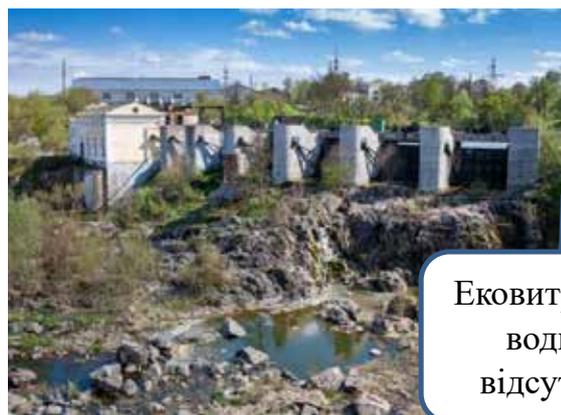
**а****б**

Рис. 3. Стеблівська ГЕС: а – перебуваючи у державній власності; б – перебуваючи у приватній власності

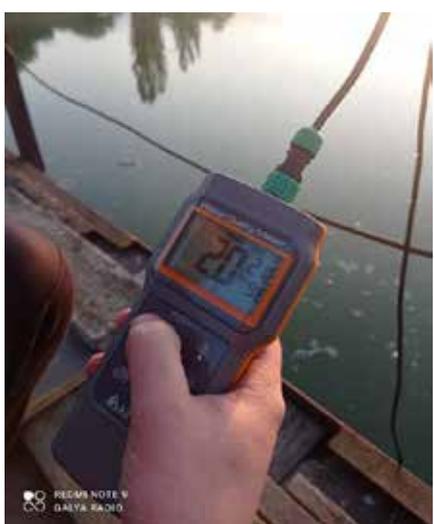
**а****б****в****г**

Рис. 4. Виміри рівня розчиненого кисню нижче за течією від Стеблівської ГЕС, виконані ГО «Сейв Рось»:
а – 3 липня 2019 р., б – 1 серпня 2021 р., в – 8 серпня 2021 р., г – 21 червня 2023 р.

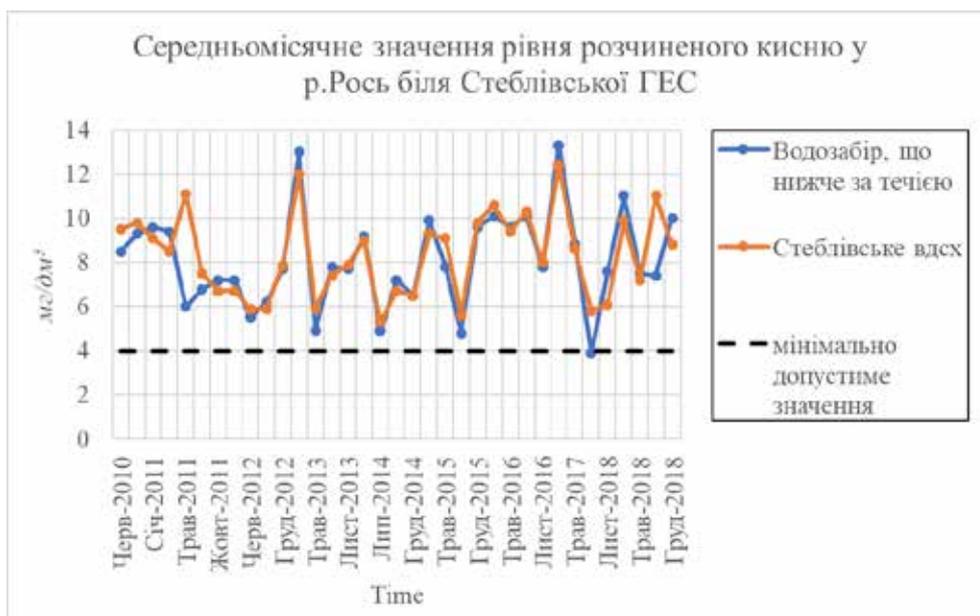


Рис. 5. Середньомісячне значення рівня розчиненого кисню в р. Росі біля Стеблівської ГЕС за даними лабораторії Держводагентства [8]

до мору риби, як це було зафіксовано в 2018 [7] і в 2021 [4].

ТОВ «Білоцерківвода». ТОВ «Білоцерківвода» – приватна компанія, яка з 2013 року тримає в концесії очисні споруди міста Біла Церква та є найбільшим забруднювачем річки Росі. Вплив підприємства на стан довкілля в цілому по регіону детально описано в роботі [3, с. 78–85]. Скид стічних вод у р. Рось показано на рис. 6.

Очисні споруди міста Біла Церква побудовані за класичною схемою, яка передбачає механічне та хімічне очищення води з використанням первинних відстійників, аеротенків та вторинних відстійників, а також – біоставків. У такій схемі очищення використовується активний мул, який після обробки необхідно зневоднити і вивезти на мулові майданчики (поля), осушити і згодом утилізувати.

Починаючи з 2013 року мешканцями територіальних громад неодноразово фіксувалися факти забруднення річки Росі стічними водами підприємства, переважно у весняний період (прикладі наведено на рис. 7).

Після певного суспільного резонансу щодо виявленого громадськістю масового забруднення річки, у 2018 році Басейнова лабораторія моніторингу вод Міжрегіонального управління охорони водосховищ Дніпра щоквартально проводила моніторинг гідрохімічного стану річки на відстані 500 м нижче за течією від вищезгаданої стічної труби, а також на водозаборах питної води в населених пунктах вище та нижче за течією [8], як показано на рис. 8.

Результати, представлені на рис. 9, демонструють, що важливі показники зазвичай були вищими

біля стічної труби та часто перевищували гранично допустиму концентрацію (ГДК).

Результати санітарно-мікробіологічного дослідження води р. Росі, проведеного 7 червня 2022 року (після повідомлення автора про вчергове виявлене забруднення) Миронівською філією ДУ «Київський обласний центр контролю та профілактики хвороб МОЗ України», наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати санітарно-мікробіологічного дослідження води р. Росі 7.06.2022 р.

Місце відбору проб відносно до місця скиду стічних вод	Індекс лактопозитивних паличок, одиниць/дм ³ (норма <5 000)
500 м вище за течією	2 300
Безпосередньо місце скидання стічних вод	24 000
500 м нижче за течією	70 000

Перевищення показників кишкової палички в річці свідчить про її забруднення стічними водами, а місце розташування свідчить про причетність до такої події саме ТОВ «Білоцерківвода».

Відповідно до Результату скринінгового моніторингу басейну Дніпра, зробленого Водною ініціативою плюс ЄС для країн Східного партнерства у 2021 році [18], стічні води ТОВ «Білоцерківвода» були основним негативним фактором, що впливав на якість во и р. Росі. Крім того, «Білоцерківводу» визнано одним із 2 основних забруднювачів басейну Дніпра.

Скидання відходів (відпрацьованого активного мулу) безпосередньо в річку є грубим порушенням

**а****б**

*Рис. 6. Скид стічних вод ТОВ «Білоцерківвода»:
а – стічна труба, б – забруднена ділянка річки біля стічної труби*

**а****б****в****г**

*Рис. 7. Відпрацьований активний мул та його залишки, виявлені у річці Росі у різні роки:
а – 2018, б – 2020, в – 2022, г – 2024*

технології очищення стічних вод. Однак типовий розмір штрафу, який на компанія періодично накладає Державна екологічна інспекція, найчастіше становить лише 520 грн [14].

Ефективні механізми впливу держави на бізнес щодо охорони довкілля у законодавстві України відсутні. Недосконалість законодавства призводить до того, що виснаження ресурсного потенціалу є для

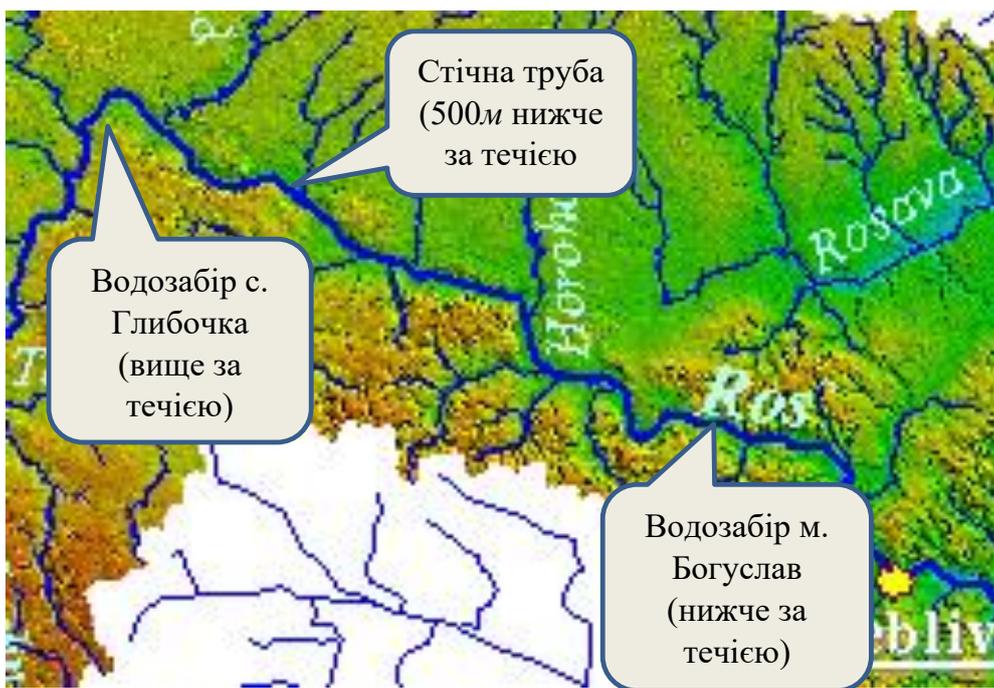
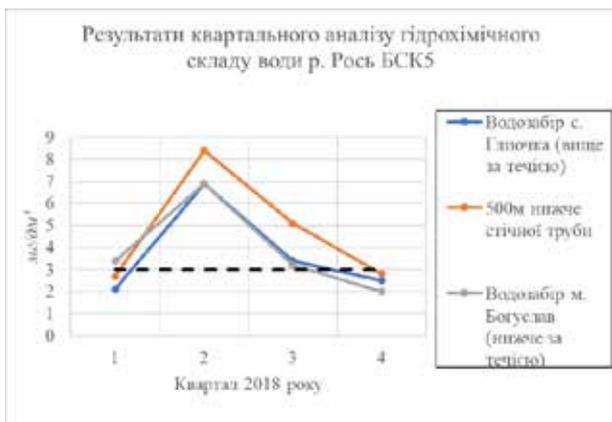
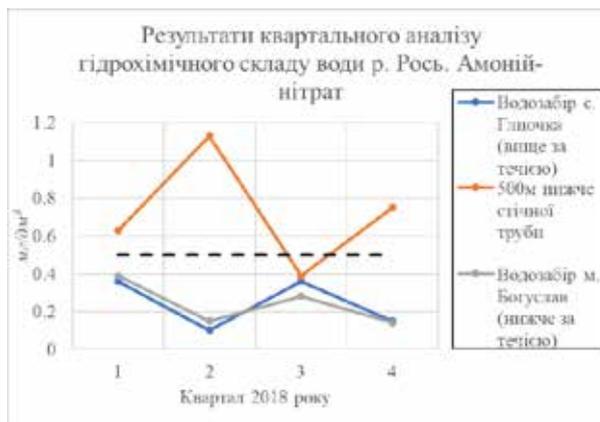


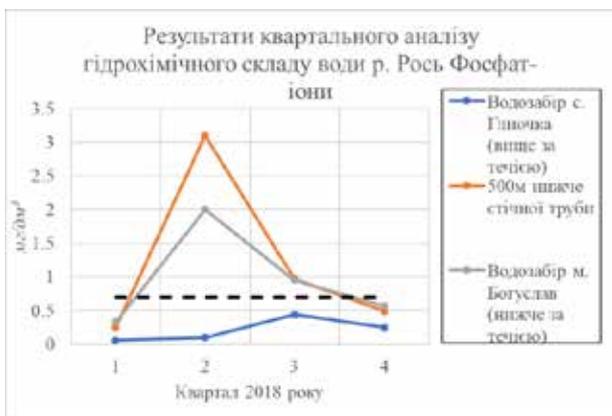
Рис. 8. Карта точок квартального моніторингу гідрохімічного складу води р. Росі



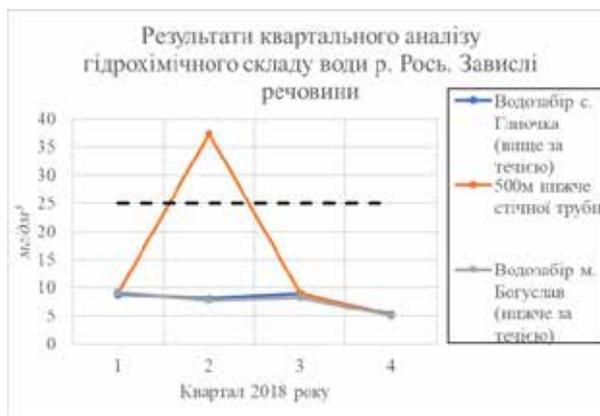
а



б



в



г

Рис. 9. Результати квартального аналізу гідрохімічного стану води р. Росі 2018 року: а – БСК5, б – амоній-нітрат, в – фосфат-іони, г – завислі речовини

підприємців економічно виправданим: вигідніше сплатити штрафи за порушення природоохоронного законодавства, ніж виконувати його вимоги.

Слід зазначити, що країнам, які розвиваються, характерне переважання секторів бізнесу, заснованих на використанні природних ресурсів, над технологічними й інтелектуальними секторами. Порівняння галузевого ВВП США і Саудівської Аравії (Таблиця 2) переконливо про таке свідчить.

Таблиця 2

Галузева частка ВВП 2011 року США та Саудівської Аравії [16]

Країна	Галузь	% ВВП
США	Сільське господарство	1
	Промисловість	22
	Сфера послуг	77
Саудівська Аравія	Сільське господарство	2
	Промисловість	68
	Сфера послуг	30

Водночас низький відсоток сільського господарства у ВВП Саудівської Аравії зумовлений поганими агрокліматичними умовами країни – жарким тропічним кліматом і пустельними ґрунтами – та дефіцитом водних ресурсів. Тому, до речі, досягнення Цілі сталого розвитку 6 для Саудівської Аравії навіть більш актуальне, ніж для більшості інших країн світу.

Структура ВВП України за цей же період була такою: 62,6 % доданої вартості створено у сфері послуг, 29,2 % – у промисловості та будівництві, 8,3 % – у сільському господарстві [12].

Країни з вищим рівнем економічного та технологічного розвитку мають більший відсоток послуг у своїй економіці – які менш шкідливі для навколишнього середовища. Менш розвинені країни мають більший відсоток в економіці екстенсивних галузей: промисловості – особливо гірничодобувної – та сільського господарства. Означені галузі негативніше впливають на довкілля загалом і на його водний компонент зокрема. Детальніше така залежність описана в роботах [17] та [22].

Висновки. Сталий розвиток передбачає дбайливе використання природних ресурсів, зокрема баланс між використанням і збереженням. Але недосконалість законодавства часто створює недостатні передумови для дбайливого використання природних ресурсів. Так, через використання річки Росі для виробництва електроенергії еквитрати води з водосховища Стеблівської ГЕС зменшилися з 2,4 м³/с майже до 0. Тому важливим заходом для досягнення сталого використання водних ресурсів р. Росі й подібних гідрооб'єктів є впровадження водозберігаючих технологій виробництва. А для України загалом актуальною є переорієнтація економіки на менш ресурсоемі галузі. Для таких потреб важлива міжнародна підтримка нашої держави, особливо в умовах агресивної війни росії.

Необхідними є також зміни до законодавства й нові дієві інструменти забезпечення його дотримання. Виконання вимог природоохоронного законодавства не має бути для підприємців обтяжливим, ніж сплата штрафів за порушення. Вдосконалення природоохоронного законодавства України щодо охорони водних ресурсів потребує вивчення досвіду і кращих практик ЄС у досягненні *цілі 6 сталого розвитку*.

Література

1. Бабій, П. О.; Вишневецький, В. І.; Шевчук, С. А. Річка Рось та її використання. Київ: Інтерпрес ЛТД, 2016. 128 с.
2. Березовий, В.Р.; Режими роботи водосховищ річки Росі (на прикладі Стеблівської ГЕС). Матеріали 89 Міжнародної наукової конференції молодих учених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки молоді – вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті», 3-7 квітня 2023 р. – К.: НУХТ, 2023. – Ч.1. – 433 с.
3. Грабовська, Т.О.; Бабій, П.О.; Олешко, О.А.; Поліщук, З.В.; Харчишин, В.М.; Будак, О.О.; Веред, П.І. Оцінка екологічного стану річки Рось у межах Білоцерківського району. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2021. № 2. 128 с. doi: 10.33245/2310-9289-2021-166-2-78-85
4. Екологічна катастрофа: у річці Рось на Черкащині масово гине риба. URL: <https://podrobnosti.ua/2413874-ekologichna-katastrofa-u-rchts-ros-na-cherkaschin-masovo-gine-riba.html> Дата звернення 12 жовтня 2025р.
5. Е-петиція “Про розробку та здійснення проекту щодо порятунку річки Рось з подальшим використанням його для відновлення водності всіх рік України та їх приток – малих річок.” URL <https://petition.president.gov.ua/petition/170066>. Дата звернення 14 жовтня 2025р.
6. Карти Генштаба. URL: <https://freemap.com.ua/karty-ukrainy/karty-genshtaba>. Дата звернення 14 жовтня 2025р.
7. Могильник замість водойми біля селища Стеблів. URL: <https://2plus2.ua/dzhedai-voiny-dorog/novyny/mogilnik-zamist-vodoymi-bilya-selisha-stebliv> Дата звернення 16 жовтня 2025 р.
8. Моніторинг та екологічна оцінка водних ресурсів України. Державне агентство водних ресурсів. URL: <http://monitoring.davr.gov.ua/ViewReports/List>. Дата звернення 16 жовтня 2025 р.
9. Наказ Міндовкілля № 302. Про утворення Міжвідомчої робочої групи з розроблення плану дій щодо оздоровлення та відновлення р. Рось. URL <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/05/302n.pdf>. Дата звернення 7 жовтня 2025р.
10. Педченко, Г.А.; Все про річку Рось і Надросся. Корсунь-Шевченківський: Смілянське КВПП “Тясмин”, 2006. 218с.
11. Річка Рось (2010). Атлас річок України. URL: <https://river.land.kiev.ua/ros.html> Дата звернення 7 жовтня 2025р.
12. Статистичні дані регіонів України. Державна служба статистики України. URL: <https://ukrstat.gov.ua>. Дата звернення 9 жовтня 2025р.

13. ТОВ “Білоцерківвода” отримала штраф за невиконаний припис екологічної інспекції. <https://bc.espresso.tv/news-bilotserkivvoda-otrimala-shtraf-za-ne-vikonaniy-pripis-ekologichnoi-inspektsii> Дата звернення 17 лютого 2025р.
14. Хільчевський, В.К.; Курило, С.М.; Дубняк, С.С.; Савицький, В.М.; Забокрицька М.Р. Гідроекологічний стан басейну річки Рось: монографія. – К.: Ніка-Центр, 2009. – 116с.
15. Шевченко, Н. Water Resources Day: figures, facts and perspectives. URL: <https://ukraine.un.org> Дата звернення 9 жовтня 2024р.
16. Швець, Г.І.; Дрозд, Н.І., Левченко, С.П. (1957) Каталог річок України. Київ: видавництво Академії наук Української РСР.
17. Babul, A. A. Sector wise GDP Contribution in Bangladesh & different countries GDP. URL: <https://www.slideshare.net/slideshow/sector-wise-gdp-in-bangladesh-different-countries-gdp/13279660#2>. Дата звернення 17 жовтня 2025 р.
18. EUWI+. Investigative Monitoring Report of the Dnipro Riser Basin by EU Water Initiative Plus for the Eastern Partnership Countries. Available at https://cuneighbourseast.eu/wp-content/uploads/2021/07/ua_dnieper_river_basin_screeningfinalreport-eng.pdf. Дата звернення 17 жовтня 2025р.
19. Report of the Secretary-General. Progress towards the Sustainable Development Goals. URL: <https://unstats.un.org>. Дата звернення 7 жовтня 2025р.
20. The 17 Goals. Sustainable Development. The United Nations Department of Economic and Social Affairs. URL: <https://sdgs.un.org/goals>. Дата звернення 18 грудня 2024 р.
21. WAREG. Protection of water resources of Ukraine: from crisis to recovery. WAREG Newsletter. Available at <https://www.wareg.org>. Дата звернення 15 жовтня 2025р.
22. Wirtz, J., Tuzovic, S., Ehret, M. (2015). Global Business Services: Increasing Specialization and Integration of the World Economy as Drivers of Economic Growth. A review. *Journal of Service Management*, 4, 565-587. doi: 10.1108/JOSM-01-2015-0024
23. World Bank Group (2023). Ukraine Rapid Damage and Needs Assessment February 2022 – February 2023. Available at <https://ukraine.un.org>. Дата звернення 17 жовтня 2025р.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ

УДК 504.4:556.53:628.1

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.4>

СУЧАСНИЙ ГІДРОХІМІЧНИЙ СТАН РІЧКИ ГУЙВА: ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА РИЗИКИ ДЛЯ ВОДОКОРИСТУВАННЯ

Василенко О.М., Родіонова О.В.

Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. Велика Бердичівська, 40, 10008, м. Житомир
vasylenko-o@zu.edu.ua

Забезпечення якості поверхневих і підземних вод є важливою умовою екологічної безпеки та здоров'я населення. Басейн річки Гуйва в межах Житомирського Полісся зазнає впливу сільського господарства, урбанізації та локальних скидів, проте комплексні дослідження його сучасного гідрохімічного стану залишаються обмеженими. Особливу увагу заслуговує село Скоморохи Житомирського району, де населення використовує підземні води для питного водопостачання, а якість поверхневих вод може впливати на стан водоносних горизонтів.

Мета роботи – оцінити гідрохімічний стан річки Гуйва в межах села Скоморохи з визначенням основних фізико-хімічних показників та потенційно небезпечних речовин. Проби відібрано у травні 2025 року згідно з ДСТУ ISO 5667-3:2001, зберігалися за температури ≤ 4 °C та досліджувалися протягом 24 годин. Показники визначали за чинними стандартами: запах і кольоровість – СПТ: 08-24/С, каламутність – ДСТУ ISO 7027:2003, рН – ДСТУ 4077-2001, жорсткість і лужність – ГОСТ 31954-2012 та ДСТУ ISO 9963-1:2010, азотні сполуки – ДСТУ 26777-85, хлориди та сульфати – ДСТУ ISO 9297:2019 та ДСТУ ISO 9280:2021, органічне забруднення – ГОСТ 23268.11-78, важкі метали – ДСТУ ISO 11885:2001.

Результати показали, що більшість показників відповідають нормам, проте зафіксовано підвищену кольоровість (34° при нормі $\leq 20^\circ$), жорсткість ($7,7$ мг-екв/дм³), лужність ($7,4$ мг/дм³) та перманганатну окисність ($10,7$ мгО₂/дм³ при нормі $5,0$). Вміст загального заліза ($0,26$ мг/дм³ при ГДК $0,2$) та марганцю ($0,1$ мг/дм³ при ГДК $0,05$) перевищував нормативи, що пов'язано як з природною геохімією Полісся (залізисті горизонти, торфовища), так і з антропогенним впливом. Інші важкі метали (кадмій, свинець, цинк, мідь) залишалися на рівні значно нижчому за гранично допустимі значення.

Наукова новизна роботи полягає у комплексній оцінці гідрохімічного складу Гуйви на малодослідженій ділянці та уточненні ролі природних і антропогенних чинників у формуванні якості води. Практичне значення результатів полягає у створенні бази для регіонального моніторингу та планування заходів із захисту водних ресурсів. *Ключові слова:* гідрохімічний стан, річка Гуйва, якість води, органічне забруднення, важкі метали, екологічна безпека, моніторинг.

Current hydrochemical state of the Huyva river: ecological safety and risks for water use. Vasylenko O., Rodionova O.

Ensuring the quality of surface and groundwater is an important condition for environmental safety and human health. The Huyva River basin within the Zhytomyr Polissya is affected by agriculture, urbanization, and local discharges, but comprehensive studies of its current hydrochemical state remain limited. The village of Skomorokhy, Zhytomyr district, deserves special attention, where the population uses groundwater for drinking water supply, and the quality of surface water can affect the state of aquifers.

The purpose of the work is to assess the hydrochemical state of the Huyva River within the village of Skomorokhy with the determination of the main physicochemical indicators and potentially hazardous substances. Samples were taken in May 2025 in accordance with DSTU ISO 5667-3:2001, stored at a temperature of ≤ 4 °C and studied for 24 hours. The indicators were determined according to current standards: odor and color – SPT: 08-24/C, turbidity – DSTU ISO 7027:2003, pH – DSTU 4077-2001, hardness and alkalinity – GOST 31954-2012 and DSTU ISO 9963-1:2010, nitrogen compounds – DSTU 26777-85, chlorides and sulfates – DSTU ISO 9297:2019 and DSTU ISO 9280:2021, organic pollution – GOST 23268.11-78, heavy metals – DSTU ISO 11885:2001.

The results showed that most indicators meet the standards, but increased color (34° at a norm of $\leq 20^\circ$), hardness (7.7 mg-eq/dm³), alkalinity (7.4 mg/dm³) and permanganate oxidation (10.7 mgO₂/dm³ at a norm of 5.0) were recorded. The content of total iron (0.26 mg/dm³ at a maximum concentration of 0.2) and manganese (0.1 mg/dm³ at a maximum concentration of 0.05) exceeded the standards, which is associated with both the natural geochemistry of Polissya (iron horizons, peat bogs) and anthropogenic impact. Other heavy metals (cadmium, lead, zinc, copper) remained at a level significantly lower than the maximum permissible values.

The scientific novelty of the work lies in the comprehensive assessment of the hydrochemical composition of the Huyva River in a poorly studied area and the clarification of the role of natural and anthropogenic factors in the formation of water quality. The practical significance of the results lies in creating a basis for regional monitoring and planning measures to protect water resources. *Key words:* hydrochemical state, Huyva River, water quality, organic pollution, heavy metals, environmental safety, monitoring.

Постановка проблеми. Водні ресурси є одним із ключових чинників сталого розвитку регіонів та забезпечення потреб населення, проте якість поверхневих вод в Україні зазнає зростаючого впливу

антропогенних чинників. Інтенсивне сільськогосподарське використання земель, розвиток індивідуальної забудови без належної каналізації, а також локальні скиди стічних вод призводять до зміни при-

родного хімічного складу водойм і погіршення їх екологічного стану.

Річки Полісся, зокрема басейн річки Гуйва, є вразливими до подібних навантажень через особливості гідрологічного режиму, наявність заболочених територій та тісний зв'язок поверхневих і підземних вод. Село Скоморохи Житомирського району розташоване в межах водозбору річки Гуйва, де поверхневі води відіграють важливу роль у підтриманні екосистем та можуть впливати на якість місцевих джерел питного водопостачання.

Попри значення цього водотоку для екологічної стабільності території та потреб населення, систематичні дослідження впливу господарської діяльності на якість води у даному регіоні залишаються обмеженими. Відсутність актуальної комплексної оцінки антропогенного навантаження ускладнює розробку науково обґрунтованих заходів для охорони та раціонального використання водних ресурсів. Це зумовлює необхідність дослідження факторів, що впливають на стан вод річки Гуйва, а також оцінки потенційних ризиків для довкілля та здоров'я населення.

Актуальність дослідження. Забезпечення якості поверхневих і підземних вод є ключовою умовою екологічної безпеки та здоров'я населення. Річка Гуйва, що протікає через Житомирський район, зазнає впливу сільськогосподарської діяльності, побутових і промислових скидів, а також кліматичних змін. Особливу увагу привертає ділянка в межах села Скоморохи, де вода з прилеглих ґрунтових горизонтів активно використовується місцевими жителями зі свердловин для питних та господарських потреб, що підвищує значущість контролю за її якістю.

Попри наявність даних щодо гідрохімічного стану річки Гуйва, динамічний характер забруднення та вплив антропогенних чинників зумовлюють потребу у систематичному та довготривалому моніторингу. Показники, такі як загальне залізо, марганець, жорсткість та органічне навантаження, здатні впливати як на екологічний стан водотоку, так і на якість підземних вод, що використовуються населенням. Регулярне оновлення даних дає змогу оцінювати сучасні тенденції змін якості води, виявляти ризики для здоров'я людей та екосистем і своєчасно реагувати на загрози забруднення. Отримані результати можуть слугувати основою для планування заходів із захисту водних екосистем та гарантування безпечного водопостачання для місцевого населення.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями Дослідження гідрохімічного стану річки Гуйва в межах села Скоморохи безпосередньо пов'язане з актуальними науковими та практичними завданнями у сфері охорони довкілля та управління водними ресурсами. Робота спрямована на виконання завдань державної екологічної політики, визначених

законодавством України [1], а також відповідає стратегічним орієнтирам інтеграції України до європейського екологічного простору, зокрема гармонізації системи моніторингу з Водною рамковою директивою ЄС [2].

Отримані результати дослідження вирішують важливе наукове завдання – визначення сучасного гідрохімічного профілю транзитних водотоків Полісся з урахуванням локального антропогенного навантаження та впливу водного басейну на якість підземних вод, що використовуються населенням. Проведений аналіз дозволяє удосконалити розуміння процесів формування складу поверхневих вод у регіонах зі змішаним типом забруднення та підвищеним природним вмістом заліза, що має значення для гідроекології та моніторингу стану водних екосистем.

З практичної точки зору, робота створює науково обґрунтовану основу для підвищення ефективності регіонального моніторингу якості води та своєчасного виявлення ризиків для здоров'я населення, яке використовує підземні води для питних та господарських потреб. Результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування, державними установами екологічного контролю та водогосподарськими організаціями для розроблення заходів з охорони та відновлення водних ресурсів, а також для вдосконалення програм управління басейнами малих і середніх річок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз екологічного стану малих річок Житомирського Полісся засвідчує потребу у системному та безперервному моніторингу їх гідрохімічних характеристик, оскільки ці водотоки особливо чутливі до змін клімату та зростаючого антропогенного навантаження. Дослідження показують, що глобальне потепління впливає на гідрологічний режим і хімічний склад річкових вод, спричиняючи сезонні коливання рівня та зміну концентрацій розчинених речовин [3]. Водні екосистеми урбанізованих територій, зокрема в межах Житомира, відчутно трансформуються під впливом побутових та промислових стоків [4].

Річка Гуйва, як одна з важливих приток Тетерева, відображає загальні тенденції деградації малих річок регіону. Дослідження засвідчують підвищене органічне навантаження, локальні перевищення за вмістом заліза та марганцю, а також чутливість водної системи до скидів неочищених або недостатньо очищених стічних вод, що призводить до погіршення кисневого режиму й розвитку евтрофікації [5, 6]. Гідрохімічний склад води Гуйви формується як природними геохімічними умовами (зокрема багатими на залізо ґрунтами та торфовищами), так і впливом промисловості та сільського господарства, тоді як антропогенне навантаження посилюється урбанізацією та транспортною інфраструктурою [7].

Аналогічні процеси характерні й для головного водотоку – річки Тетерів. Тут простежуються значні зміни у гідрохімічному режимі, спричинені урбані-

зацією, промисловим розвитком, сільськогосподарським використанням земель та гідротехнічними втручаннями, що порушують природний водообмін та посилюють процеси евтрофікації [8]. Зростання концентрацій біогенних елементів, зокрема азоту й фосфору, пов'язане зі скидами неочищених стоків, що стимулює розвиток фітопланктону, призводить до дефіциту кисню й змін біоценозу. Дослідження важких металів у басейні Тетерева свідчать про перевищення гранично допустимих концентрацій міді, свинцю, кадмію, цинку та марганцю [9]. Їхнє надходження зумовлене як промисловими та сільськогосподарськими скидами, так і дифузним забрудненням, стоком з доріг та атмосферним переносом. Значна частина металів акумулюється у донних відкладах, звідки вони можуть повторно потрапляти у воду при зміні гіdroхімічного балансу, погіршуючи екологічний стан водойм із уповільненим водообміном.

Систематичне дослідження приток, зокрема Гуйви, дає змогу не лише оцінювати локальні загрози, а й розуміти загальні тенденції деградації басейну Тетерева, що важливо для ефективного управління водними ресурсами Полісся.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявні дослідження екологічного стану малих річок Житомирського Полісся, зокрема Гуйви, залишаються недостатньо вивченими питання комплексного впливу природних та антропогенних чинників на формування гіdroхімічного складу води та його сезонної динаміки. Досі бракує системних досліджень, що поєднують аналіз основних фізико-хімічних показників із оцінкою впливу локальних джерел забруднення (побутові та промислові стоки, аграрний стік, транспортна інфраструктура) та природної геохімії регіону, зокрема щодо підвищеного вмісту заліза та марганцю. Відсутній постійний моніторинг, який дозволяв би оперативно виявляти зміни водної якості та оцінювати їхні потенційні ризики для здоров'я населення, що використовує підземні води для питного водопостачання. Саме ці аспекти становлять наукову та практичну прогалину, яку покликано заповнити дане дослідження.

Новизна дослідження. Наукова новизна проведеного дослідження полягає у комплексній оцінці сучасного гіdroхімічного стану річки Гуйва на основі одночасного аналізу широкого спектра фізико-хімічних показників води, включаючи як традиційні індикатори якості (запах, кольоровість, прозорість, загальна жорсткість, лужність), так і екоотоксикологічно значущі елементи та сполуки (залізо, марганець, кадмій, цинк, мідь, свинець).

Методологічне та загальнонаукове значення. Дослідження дає нові дані для локальної водогосподарської політики та оцінки потенційних ризиків для здоров'я населення, яке використовує підземні води

у межах села Скоморохи, та підкреслює необхідність постійного моніторингу для своєчасного виявлення змін екологічного стану водойми.

Викладення основного матеріалу. Відбір проб води для дослідження було проведено у травні 2025 року на території села Скоморохи Житомирського району Житомирської області відповідно до вимог ДСТУ ISO 5667-3:2001, який регламентує правила пробовідбору, транспортування та консервації зразків. Зібрані проби зберігалися у стерильних умовах при температурі не вище 4 °C та були проаналізовані не пізніше ніж через 24 години після відбору.

Фізико-хімічне дослідження включало визначення основних показників якості води за чинними стандартами. Запах і кольоровість оцінювали за методикою СПТ: 08-24/С, каламутність – відповідно до ДСТУ ISO 7027:2003, а рівень рН визначали за ДСТУ 4077-2001. Загальну жорсткість та лужність вимірювали згідно з ГОСТ 31954-2012 та ДСТУ ISO 9963-1:2010. Іонний склад оцінювали шляхом визначення вмісту амонійного азоту, нітритів та нітратів за ДСТУ 26777-85, хлоридів – за ДСТУ ISO 9297:2019, сульфатів – за ДСТУ ISO 9280:2021. Показник окисності встановлювали перманганатним титриметричним методом відповідно до ГОСТ 23268.11-78. Концентрації важких металів (заліза, кадмію, цинку, міді, марганцю та свинцю) визначали методом атомно-абсорбційної спектроскопії за ДСТУ ISO 11885:2001. Отримані дані було зіставлено з вимогами Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) [10], що дало змогу коректно оцінити безпечність дослідженої води для можливого використання населенням села Скоморохи, яке споживає воду з підземних джерел.

Отримані дані наведено в таблиці 1.

Аналіз даних, поданих у таблиці, свідчить, що вода річки Гуйва в межах села Скоморохи за більшістю показників відповідає нормативам для питної води, проте виявлено низку перевищень, які можуть свідчити про підвищене антропогенне та природне навантаження на водну екосистему. Органолептичні характеристики загалом задовільні: запах оцінено на рівні 2 балів (граничне допустиме значення), однак кольоровість досягає 34° при нормативі до 20°, що свідчить про наявність розчинених органічних речовин і можливу гумінізацію води. Прозорість становить 30 см, що відповідає граничному рівню, але наявність значного осаду вказує на підвищену кількість завислих частинок. Серед фізико-хімічних параметрів виявлено перевищення загальної жорсткості (7,7 мг-екв/дм³ при нормі до 7,0) та загальної лужності (7,4 мг/дм³ при нормі 0,5–6,5), що може бути зумовлено як природними геохімічними особливостями регіону, так і впливом побутових чи сільськогосподарських стоків.

Показники якості води р. Гуйва на території села Скоморохи

Найменування показника	Значення показника	Норми для питної води	Одиниці вимірювання
Запах	26	До 26	Бали
Кольоровість	34	До 20	Градуси
Прозорість	30 см	< 30 см	см
Осад	значний		
Загальна жорсткість	7,7	До 7,0	мг-екв/дм ³
Лужність загальна	7,4	0,5–6,5	мг/дм ³
Хлориди	57	До 250	мг/дм ³
Сульфати	68	До 250	мг/дм ³
Аміак	< 0,05	До 0,5	мг/дм ³
Нітриди	< 0,003	До 0,5	мг/дм ³
Нітрати	2,1	До 50,0	мг/дм ³
Окисність перманганатна	10,7	До 5,0	мгО ₂ /дм ³
pH	8,12	6,5–8,5	Од. pH
Залізо, загальне	0,26	До 0,2	мг/дм ³
Кадмій	< 0,0005	До 0,001	мг/дм ³
Цинк	< 0,005	До 1,0	мг/дм ³
Мідь	< 0,005	До 1,0	мг/дм ³
Марганець	0,1	До 0,05	мг/дм ³
Свинець	< 0,005	До 1,0	мг/дм ³

Мінеральний склад води за вмістом хлоридів (57 мг/дм³) і сульфатів (68 мг/дм³) залишається в межах допустимих значень, що свідчить про відсутність процесів засолення та надмірного мінералізаційного навантаження. Концентрації аміаку, нітридів і нітратів є низькими (аміак <0,05 мг/дм³, нітриди <0,003 мг/дм³, нітрати 2,1 мг/дм³ при нормі до 50), що вказує на незначний вплив побутових або органічних стоків на дослідженій ділянці. Проте перманганатна окисність становить 10,7 мгО₂/дм³, що більш ніж удвічі перевищує гранично допустиме значення (5,0 мгО₂/дм³) і свідчить про підвищене органічне забруднення води.

Серед важких металів зафіксовано перевищення вмісту загального заліза (0,26 мг/дм³ при ГДК 0,2) та марганцю (0,1 мг/дм³ при ГДК 0,05), що може бути пов'язано як із природною геохімією регіону (збагачені залізом та марганцем ґрунти й підземні води), так і з антропогенним впливом. Решта токсичних металів – кадмій, цинк, мідь і свинець – перебувають на рівні значно нижчому за допустимі норми.

Висновки. Проведене дослідження гідрохімічного стану річки Гуйва в межах села Скоморохи Житомирського району показало, що вода за більшістю показників відповідає чинним нормативам для питного водопостачання, проте виявлено окремі перевищення, які свідчать про підвищене органічне навантаження та специфічні природно-геохімічні особливості. Зокрема, зафіксовано підви-

щення кольоровість (34°), наявність значного осаду, перевищення загальної жорсткості (7,7 мг-екв/дм³), лужності (7,4 мг/дм³) та перманганатної окисності (10,7 мгО₂/дм³). Концентрації азотних сполук (аміак, нітриди, нітрати), хлоридів та сульфатів залишаються в межах допустимих значень, однак загальне залізо (0,26 мг/дм³) та марганець (0,1 мг/дм³) перевищують нормативи, що може бути зумовлено природною геохімією території у поєднанні з локальним антропогенним впливом. Загалом якість води можна охарактеризувати як задовільну, але з окремими ознаками органічного та мінерального навантаження.

Перспективи дослідження. Перспективи подальших досліджень полягають у проведенні систематичного моніторингу гідрохімічного складу води річки Гуйва з урахуванням сезонної динаміки та впливу природних і антропогенних чинників, зокрема сільськогосподарського стоку та локальних джерел забруднення. Доцільним є розширення спектра контрольованих показників за рахунок біологічних та токсикологічних індикаторів для більш повної оцінки екологічного стану водної екосистеми. Особливо важливим є відстеження вмісту заліза та марганцю, а також параметрів органічного забруднення, що можуть впливати на якість підземних вод, які використовуються місцевим населенням для питних потреб. Такі дослідження можуть стати основою для удосконалення регіональних програм управління водними ресурсами та заходів екологічної безпеки.

Література

1. Водний кодекс України : Закон України від 06.06.1995 № 213/95-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1995. № 24. Ст. 189. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 07.10.2025).
2. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities. 2000. L 327. P. 1–72. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060> (дата звернення: 07.10.2025).
3. Павельчук Є. М., Сніжко С. І. Гідролого-гідрохімічні характеристики річок Житомирського Полісся в умовах глобального потепління. Житомир: Волинь, 2017. 244 с.
4. Главацька Н. Гідроекологічний стан річок в межах міста Житомира. Міськість: наука, культура, мистецтво. [Електронний ресурс] 2015. № 5(2). С. 86–91. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/1540/1/Glavatska_Gidroek_stan_M_2015.pdf (дата звернення: 07.10.2025)
5. Смілий П. М. Оцінка екологічного стану поверхневих вод річки Гуйва / П. М. Смілий. Актуальні проблеми та перспективи розвитку регіонів : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. (Рівне, 3 квіт. 2020 р.). Рівне : РВЦ МЕРУ ім. акад. С. Дем'янчука, 2020. С. 106–110.
6. Смілий П.М., Гопчак І.В., Басюк Т.О. Екологічна оцінка якості поверхневих вод Житомирського Полісся. Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія, 2021. № 2(60). С. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.2.5>.
7. Лозовіцький П. С., Молочко А. М. Формування стоку та екологічний стан води річки Гуйва. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-соціальні науки. 2018. Вип. 2 (38). С. 21–26.
8. Слободенюк М. О. Вплив антропогенних факторів на екологічний стан річки Тетерів / М. О. Слободенюк, В. В. Підліснюк. Наук. вісник Нац. аграрного ун-ту. 2006. Вип. 95, ч. 2. С. 166–171.
9. Мислива Т. М., Кот І. С. Важкі метали у водах малих річок і боліт Житомирського Полісся. Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету. 2011. № 2, т. 1. С. 58–68. URL: <http://lib.znau.edu.ua/jspui/handle/123456789/1234> (дата звернення: 07.10.2025)
10. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10): затв. наказом МОЗ України від 12.05.2010 № 400, зареєстр. в Мін'юсті України 01.07.2010 за № 452/17747. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10>, (дата звернення: 07.10.2025)

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 556.18:528.8:004.94(477.8)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.5>

МОДЕЛЮВАННЯ КОМПОНЕНТІВ ВОДНОГО БАЛАНСУ БАСЕЙНУ ДНІСТРА ЗАСОБАМИ ГІС

Давибіда Л.І.

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

У статті розглянуто проблему формування та просторово-часової мінливості компонентів водного балансу басейну річки Дністер, що є другою за величиною річкою України та відіграє ключову роль у забезпеченні водними ресурсами значної частини території держави. Під впливом кліматичних змін, антропогенного навантаження та воєнних дій у регіоні спостерігаються суттєві трансформації гідрологічного режиму, зокрема виснаження водних ресурсів, збільшення частоти посух, зниження рівня ґрунтових і підземних вод, погіршення якості води.

Метою дослідження є розроблення комплексного геоінформаційного підходу до моделювання компонентів водного балансу басейну Дністра із застосуванням супутникових даних і хмарної платформи Google Earth Engine (GEE). Для реалізації цього підходу використано дані про опади з набору CHIRPS та показники евапотранспірації з продукту MOD16A2 (MODIS), а також адаптовано алгоритм інтегрованого розрахунку водного балансу та здійснено обчислення індексів EVI (Enhanced Vegetation Index) та MSI (Moisture Stress Index), що дозволяють відобразити рівень екологічного стресу території.

Отримані результати демонструють виражену просторову мінливість компонентів водного балансу: у верхній частині басейну, де переважають гірські ландшафти, спостерігаються вищі обсяги опадів і позитивний баланс, натомість у нижній частині басейну, поблизу Чорного моря, характерним є дефіцит водних ресурсів через перевищення показників евапотранспірації над кількістю опадів. Часовий аналіз за 2014-2024 рр. засвідчив сезонну динаміку чергування періодів надлишку та дефіциту вологи, що зумовлює нестабільність водного режиму. Розроблений алгоритм може бути використаний органами водного менеджменту, екологічними службами та науковими установами для оперативного аналізу стану водних ресурсів і підтримки прийняття управлінських рішень. Отримані результати забезпечують новий рівень деталізації оцінки водних ресурсів басейну Дністра та можуть бути використані для оптимізації управління водними ресурсами та планування адаптаційних заходів у контексті зміни клімату. *Ключові слова:* опади, евапотранспірація, Google Earth Engine, супутникові дані, геоінформаційні технології, мультиспектральні індекси.

Modeling the water balance components of the Dniester River basin using GIS tools. Davybid L.

The article discusses the problem of formation and spatial-temporal variability of water balance components in the Dniester River basin, the second largest river in Ukraine. It is key in providing water resources to a significant part of the country. Under the influence of climate change, anthropogenic pressure, and military actions in the region, significant transformations of the hydrological regime are observed, particularly depletion of water resources, increased frequency of droughts, reduction of soil and groundwater levels, and deterioration of water quality.

The study aims to develop a comprehensive geoinformation approach to modelling the components of the water balance of the Dniester basin using satellite data and the Google Earth Engine (GEE) cloud platform. To implement this approach, precipitation data from the CHIRPS dataset and evapotranspiration indicators from the MOD16A2 (MODIS) product, as well as an adapted algorithm for integrated water balance calculation and the calculation of EVI (Enhanced Vegetation Index) and MSI (Moisture Stress Index) indices, which allow the level of ecological stress in the territory to be reflected.

The results obtained demonstrate significant spatial variability in water balance components: in the upper part of the basin, where mountainous landscapes prevail, higher precipitation volumes and a positive balance are observed, while in the lower part of the basin, near the Black Sea, there is a characteristic water deficit due to evapotranspiration exceeding precipitation. A time analysis for 2014-2024 showed seasonal dynamics of alternating periods of moisture surplus and deficit, which causes instability in the water regime. Water management authorities, environmental services, and scientific institutions can use the developed algorithm for operational analysis of the state of water resources and to support management decision-making. The results provide a new level of detail in assessing water resources in the Dniester basin. They can be used to optimise water resource management and plan adaptation measures in the context of climate change. *Key words:* precipitation, evapotranspiration, Google Earth Engine, satellite data, geoinformation technologies, multispectral indices.

Постановка проблеми. Річка Дністер є другою за величиною в Україні за обсягом водних ресурсів і відіграє ключову роль у забезпеченні водного балансу регіону. Площа її водозбірного басейну становить близько 72,9 тис. км², з яких 73% (53,5 тис. км²) розташовані на території України. Загальна довжина річки сягає 1352 км, з яких 912 км (67%) проходять територією України. Україна володіє верхньою течією та гирлом Дністра, тоді як приблизно 225 км річки є спільною

українсько-молдовською ділянкою, а 475 км протікають територією Республіки Молдова. Невелика частина витоків розташована в межах Польщі.

У сучасних умовах басейн Дністра зазнає суттєвих екологічних та гідрологічних змін, спричинених глобальними кліматичними зрушеннями, неефективним управлінням природними ресурсами, а останнім часом – і наслідками воєнної агресії. Це призводить до виснаження та дефіциту водних ресурсів, що нега-

тивно позначається на екосистемах, соціально-економічному розвитку регіону та стані довкілля [1, 2]. Серед основних наслідків деградації водного режиму у першу чергу слід виділити підвищення мінливості обсягів річкового стоку, погіршення якості води, скорочення біорізноманіття, збільшення частоти й інтенсивності посух і екстремальних погодних явищ, а також зниження рівня ґрунтових вод.

Актуальність дослідження. Для розроблення ефективних стратегій управління водними ресурсами необхідно глибше розуміти баланс та динаміку формування водних запасів, а також просторово-часові закономірності їх змін. З огляду на це, актуальним є застосування сучасних геоінформаційних технологій для комплексного аналізу водного балансу басейну Дністра.

У даному дослідженні використано геоінформаційні методи моделювання на основі хмарної платформи Google Earth Engine, що дає змогу оцінити основні компоненти водного балансу річкового басейну в динаміці, забезпечуючи високий рівень просторової та часової деталізації результатів [3].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дані дослідження проводились в рамках виконання науково-дослідних робіт на тему: «Дослідження розвитку та активізації небезпечних геологічних процесів в умовах природно-техногенної дестабілізації довкілля на основі геоінформаційного підходу» (державний номер реєстрації – 0121U113626) Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Комплексні геоекологічні дослідження річково-басейнової системи Дністра зумовлені високим ступенем господарського освоєння та інтенсивною експлуатацією природних ресурсів [4] та часто включають застосування технологій геоінформаційно-картографічного моделювання [5]. Зокрема були комп'ютерно-картографічні моделі басейнів окремих приток та інформаційні бази даних, що відображають стан басейнових систем [6, 7]. Для аналізу тенденцій зміни стоку води та наносів, а також у прогнозних цілях активно використовуються методи множинної кореляції для гідрологічних та метеорологічних рядів [8]. В останні роки проводилися дослідження прогнозування змін стоку річок басейну Дністра за допомогою числових кліматичних моделей, які показали тенденцію до зниження загального об'єму стоку, що пов'язують із впливом глобального потепління та гідротехнічних споруд. Разом із тим, у Карпатській частині басейну фіксуються високі показники модулів стоку води на тлі зменшення водності річок рівнинної території України [9].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість досліджень, присвячених гідрологічним характеристикам басейну Дністра, низка важливих аспектів залишається недо-

статньо вивченою. Зокрема, більшість робіт зосереджуються на оцінці окремих компонентів водного балансу або аналізі короткострокових змін стоку, тоді як комплексний просторово-часовий аналіз взаємозв'язків між складовими балансу (опади, випаровування, поверхневий і підземний стік) у межах усього басейну виконувався обмежено. Крім того, мережі гідрологічних та гідрогеологічних спостережень останніми десятиліттями істотно скоротилися, що ускладнює можливість моніторингу водних ресурсів у реальному часі та формування надійних прогнозів. Таким чином, актуальним є розроблення підходу до комплексного моделювання компонентів водного балансу басейну Дністра з використанням сучасних геоінформаційних технологій, який дозволяє забезпечити високу деталізацію просторових і часових змін, виявити основні тенденції та визначити зони потенційного дефіциту водних ресурсів.

Новизна. Уперше для території басейну річки Дністер застосовано інтегрований геоінформаційний підхід до моделювання компонентів водного балансу із використанням даних супутникового моніторингу та хмарної платформи Google Earth Engine. Розроблений підхід дозволив поєднати багаторічні дані супутникових спостережень, кліматичні показники і гідрологічну інформацію у єдиному середовищі просторового аналізу, визначити просторово-часові закономірності змін основних компонентів водного балансу в межах усього басейну та виявити ділянки з підвищеним ризиком дефіциту водних ресурсів під впливом кліматичних та антропогенних чинників.

Методологічне або загальнонаукове значення. Водний баланс у гідрологічній системі є базовим поняттям, що відображає взаємозв'язок між надходженням і витратами води для певної території. До складових надходження належать опади (P), зокрема дощ і сніг, тоді як витрати води відбуваються через стік (Q) та евапотранспірацію (ET). Додатково враховується зміна запасів води (ΔS), що охоплює варіації у вологості ґрунту, рівні підземних вод і водних об'ємах у природних сховищах [10]. У найзагальнішому вигляді водний баланс можна виразити як різницю між сумарним надходженням і сумарним вилученням води, що визначає загальну доступність водних ресурсів на певній території та слугує основою для оцінки її гідрологічного стану:

$$P-ET=Q+\Delta S.$$

Для створення просторових і часових моделей водного балансу в Google Earth Engine було використано адаптований і вдосконалений алгоритм, запропонований дослідниками з Spatial Informatics Group (США) та Asian Disaster Preparedness Centre (Таїланд) [11].

У дослідженні використовувалися такі набори даних:

1) CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) – набір даних про опади,

розроблений Climate Hazards Center. Цей продукт охоплює понад 30 років спостережень і поєднує супутникові знімки з просторовою роздільною здатністю $0,05^\circ$ (~ 5 км) із наземними даними спостережних станцій *in situ*. CHIRPS забезпечує побудову глобальних сіткових часових рядів опадів, що широко використовуються для аналізу кліматичних тенденцій, оцінки водного балансу та моніторингу сезонних посух.

2) MOD16A2 Version 6.1 – Evapotranspiration/Latent Heat Flux – комбінований продукт місії MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), який містить 8-денні середні значення евапотранспірації та латентного теплового потоку з просторовою роздільною здатністю 500 м на піксель. Дані використовуються для оцінки втрат води з поверхні суші та рослинності внаслідок випаровування та транспірації, що є ключовими компонентами водного балансу.

Крім того, розроблений алгоритм дозволяє обчислювати основні вегетаційні та вологісні індекси – EVI (Enhanced Vegetation Index) та MSI (Moisture Stress Index), які є важливими показниками стану рослинності та вологості поверхні. Їх використання забезпечує детальне відображення просторово-часових закономірностей розвитку та поширення посух, а також дозволяє виявляти зони екологічного стресу у межах басейну.

Виклад основного матеріалу. Розроблена просторово-часова модель розподілу опадів у басейні річки Дністер (рис. 1) демонструє виражену територіальну та сезонну мінливість. Аналіз середньомісячних значень показує, що у верхній частині басейну спостерігається найбільша кількість опадів – понад 69 мм на місяць, що зумовлено впливом орографічних факторів Карпатського регіону. Натомість у нижній частині басейну, поблизу узбережжя Чорного моря, кількість опадів істотно менша – до 32 мм на місяць. Часовий аналіз опадів за період 2014–2024 рр. засвідчив значні міжрічні та сезонні коливання, з характерними піковими значеннями у весняно-літній період та мінімумами взимку,

що відображає природну циклічність кліматичних процесів у регіоні.

Просторовий розподіл середньомісячної евапотранспірації (рис. 2) виявляє контрастну залежність відносно опадів: у нижній частині басейну спостерігаються вищі показники випаровування, тоді як у гірських районах – нижчі, що свідчить про вплив температурного та ландшафтного градієнтів на водний баланс території.

Розрахований водний баланс, визначений як різниця між обсягами опадів (P) та евапотранспірації (ET), демонструє виражену просторово-часову мінливість у межах басейну річки Дністер (рис. 3).

У верхній частині басейну переважають умови позитивного водного балансу, де кількість опадів перевищує втрати через евапотранспірацію, що сприяє поповненню запасів ґрунтових і підземних вод. Натомість у нижній частині басейну спостерігається негативний баланс, який відображає дефіцит вологи та потенційні ризики виснаження водних ресурсів, особливо в посушливі сезони. Часовий аналіз за період дослідження засвідчив чітку сезонну динаміку, із чергуванням періодів надлишку (весняно-літній сезон) та дефіциту (літньо-осінній період) водних ресурсів. У місяці з підвищеними опадами спостерігається позитивний водний баланс, що забезпечує відновлення та стабілізацію водного режиму річки. Натомість у посушливі місяці з високими значеннями евапотранспірації формується негативний баланс, який може призводити до зниження рівня поверхневих і підземних вод, посилення екологічного стресу та порушення стабільності водних екосистем.

На рисунку 4 представлено поєднання просторових і часових даних, що забезпечує комплексне уявлення про стан рослинності та динаміку вологості в межах досліджуваної території.

Карта середньомісячного індексу рослинності (EVI) відображає просторовий розподіл продуктивності рослинного покриву, тоді як карта середньомісячного модифікованого індексу вологості (MSI) демонструє вміст вологи в рослинності та ґрунті.

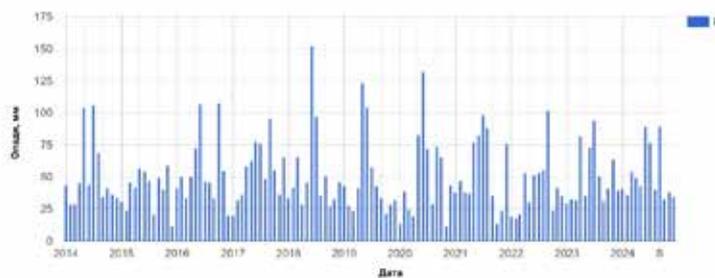
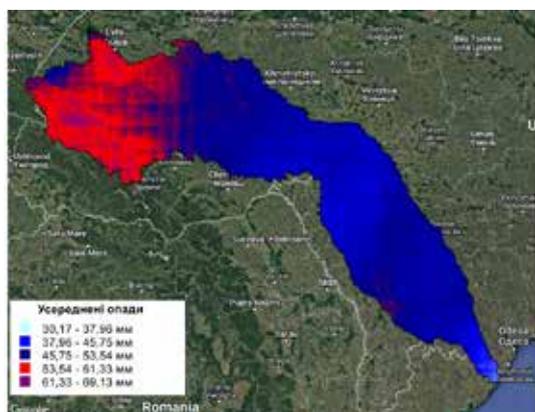


Рис. 1. Середня кількість опадів у басейні річки Дністер (ліворуч) та середньомісячна кількість опадів у 2014–2024 роках (праворуч)

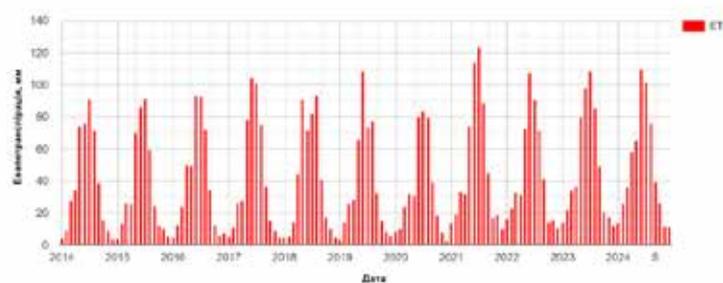
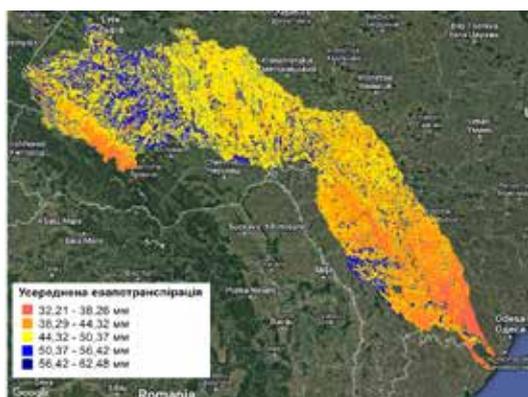


Рис. 2. Середня евапотранспірація в басейні річки Дністер (ліворуч) та середньомісячна евапотранспірація у 2014–2024 роках (праворуч)

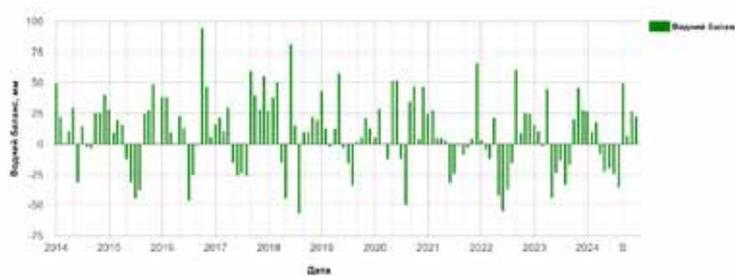
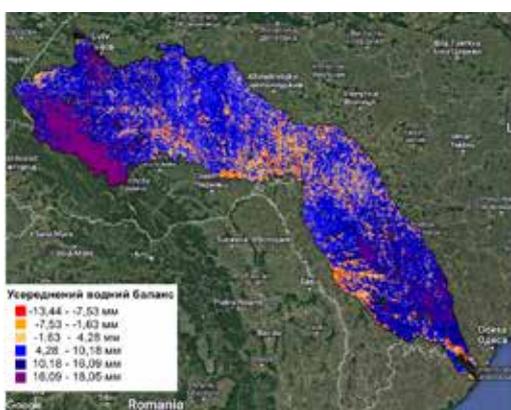


Рис. 3. Середній водний баланс у басейні річки Дністер (ліворуч) та середньомісячний водний баланс у 2014–2024 роках (праворуч)

Графік часових рядів ілюструє зміни показників EVI та MSI у період із січня 2017 року по жовтень 2024 року, що дозволяє детально простежити сезонні та міжрічні коливання обох індексів. Значення EVI характеризуються вираженими піковими періодами, які відповідають фазам активної вегетації, тоді як MSI демонструє частіші та більш варіативні зміни, що свідчить про динамічні коливання вологості під впливом погодних умов і кліматичних факторів. Поєднання просторових і часових даних дозволяє глибше зрозуміти взаємозв'язок між станом рослинності та гідрологічними умовами, а також виявити території, схильні до посухи чи вологості дефіциту.

Головні висновки. Територія басейну Дністра стикається з проблемами, пов'язаними зі зміною клімату, неефективним управлінням ресурсами та наслідками російської військової агресії, що призводить до значного дефіциту води. У свою чергу, ці проблеми негативно впливають на екосистеми, громади та економіку, спричиняючи коливання річкового стоку, погіршення якості води, зниження рівня ґрунтових вод та збільшення частоти посух. Проведений геопросторовий аналіз показав значну

мінливість кількості опадів, евапотранспірації та водного балансу в межах досліджуваної території. Водний баланс є позитивним у верхній частині басейну, що свідчить про достатню забезпеченість водними ресурсами, тоді як для нижньої частини басейну характерним є дефіцит водних ресурсів. Отримані результати підкреслюють необхідність ефективних стратегій управління для вирішення проблеми сезонної мінливості доступності води та забезпечення стабільності екосистеми.

Перспективи використання результатів дослідження. Використання передових технологічних інструментів, зокрема хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine, є необхідним для комплексного моніторингу водних ресурсів, оцінки ефективності стратегій управління та адаптації до змін клімату, а також збереження екологічного ландшафту басейну Дністра. Розроблений для басейну Дністра скрипт, що дозволяє здійснити оцінку водного балансу на основі відкритих даних супутникових спостережень, може бути адаптований до інших територій, що дозволить ширше застосовувати запропоновану методологію і потенційно сприяє більш ефективному управлінню водними ресурсами.

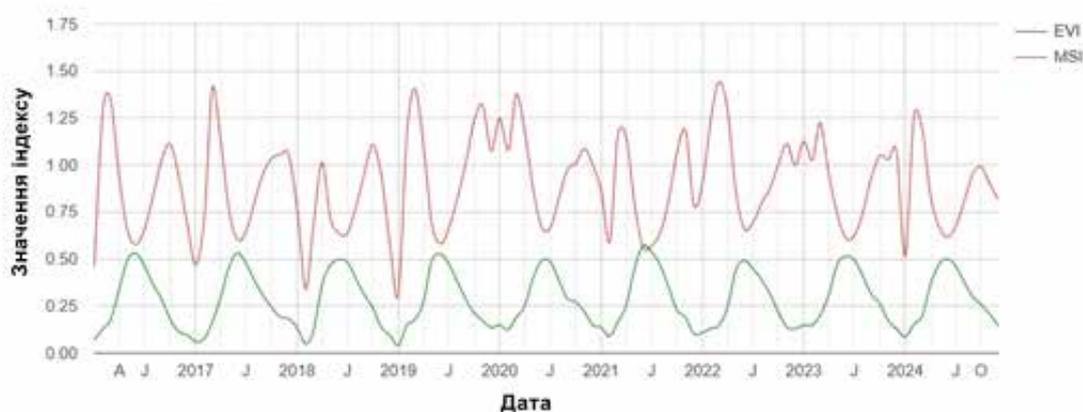
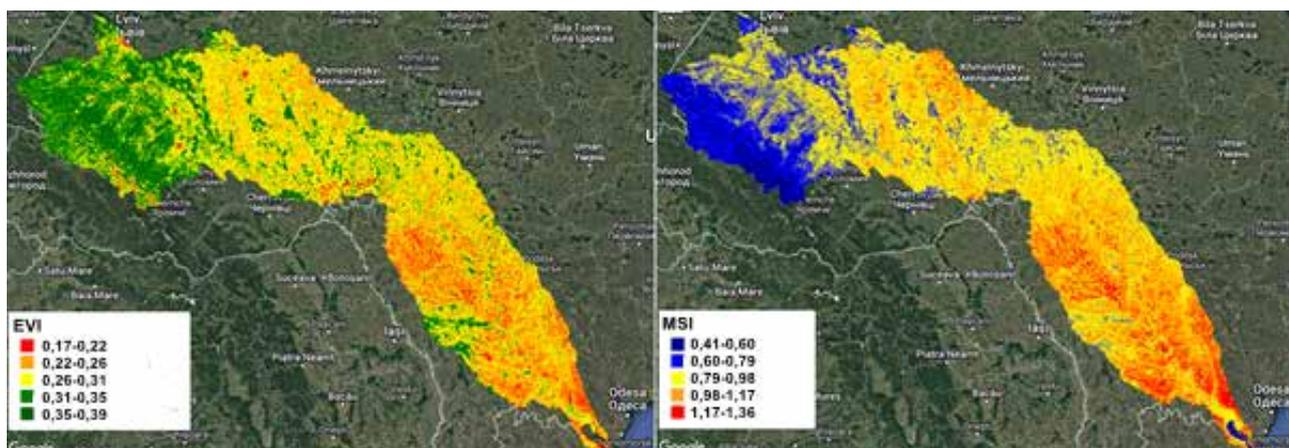


Рис. 4. Середні значення EVI (вгорі ліворуч), середні значення MSI (вгорі праворуч) та часовий ряд для індексів (внизу)

Література

- Didovets, I., Krysanova, V., Hattermann, F. F., del Rocio Rivas López, M., Snizhko, S., Müller Schmied, H. Climate change impact on water availability of main river basins in Ukraine. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 2020. № 32, 100761. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2020.100761>.
- Popov, M., Michaelides, S., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., & Ivanov, S. Assessing long-term land cover changes in watershed by spatiotemporal fusion of classifications based on probability propagation: The case of Dniester river basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. № 22, 100477. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100477>.
- Davybida, L. Water balance assessment using Google Earth Engine: case of the Dniester River Basin. *18th International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"*. 2025. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510109>.
- Пилипчук О.В. Геоекологія річково-басейнової системи верхнього Дністра: монографія / за ред. І.П. Ковальчука. Львів–Київ: ЛНУ імені Івана Франка, 2017. 284 с.
- Шибанова, А. М., Погребенник, В. Д., Мітрясова, О. П., Руда, М. В., Джумеля, Е. А., Паславський, М. М. Екологічне оцінювання якості води річки Дністер. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. 31(5), 74-78. <https://doi.org/10.36930/40310511>.
- Popov, M., Michaelides, S., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Ivanov, S. Assessing long-term land cover changes in watershed by spatiotemporal fusion of classifications based on probability propagation: The case of Dniester river basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2021. 22, 100477. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100477>.
- Adamenko, Y. S., Arkhypova, L. M., & Mandryk, O. M. Territorial Normative of Quality of Hydroecosystems of Protected Territories. *Hydrobiological Journal*. 2017. № 53(2), 50–58. <https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i2.50>.
- Loboda, N. S., Kozlov, M. O., Katynska, I. V. Evaluation of water resources changes of the Mountain Dniester in 20th century following the RCP8.5 scenario and based on the "climate-runoff" model. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*. 2021. № 28, 48–64. <https://doi.org/10.31481/UHMJ.28.2021.05>.

9. Grebin V. Forecasting the Runoff on Rivers of the Dnister River Basin According to the REMO Numeric Climatic Model. *World Science*. 2018. № 9(37), 26-32. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30092018/6131.
10. Mohajerani, H., Zema, D. A., Lucas-Borja, M. E., & Casper, M. Understanding the water balance and its estimation methods. *Precipitation: Earth Surface Responses and Processes*, 2021. pp. 193–221. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00019-7>.
11. Poortinga, A., Nguyen, Q., Thwal, N.S., Nicolau, A.P. Water Balance and Drought. Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine. *Springer, Cham*. 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_44.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 502.11:342.951:35.071.5](282.247.324)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.6>

РОЛЬ СТРАТЕГІЧНОЇ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ У ФОРМУВАННІ СТРАТЕГІЙ РОЗВИТКУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД ЧЕРНІГІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ МАЛИХ РІЧОК ПОНИЗЗЯ ДЕСНИ

Карпенко Ю.О., Івусь Т.І.

Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка
вул. Гетьмана Полуботка, 53, 14000, м. Чернігів
yuch2011@i.ua, tanya-ivus@ukr.net

Українське суспільство нині перебуває на етапі глибоких структурних змін, що охоплюють механізми управління просторовим розвитком, раціональне природокористування та охорону навколишнього середовища. В умовах децентралізації саме територіальні громади стають основними суб'єктами реалізації державної політики сталого розвитку, формування стратегічних пріоритетів та управління природно-ресурсним потенціалом. У цьому контексті особливої уваги набуває необхідність інтеграції екологічних підходів у процес стратегічного планування і розвитку територій, що відповідає європейським стандартам.

Одним із ключових інструментів забезпечення екологічної орієнтованості стратегічних рішень є стратегічна екологічна оцінка (СЕО), запроваджена в Україні відповідно до Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку» від 20 березня 2018 року [1]. СЕО покликана забезпечити врахування екологічних наслідків ще на етапі розроблення документів державного планування – стратегій, програм, схем і планів розвитку територій. Таким чином, вона виступає не лише процедурою оцінювання впливів, а й інструментом запобігання екологічним ризикам, підвищення прозорості та якості управлінських рішень.

Особливої актуальності проблематика проведення стратегічної екологічної оцінки набуває в регіонах, де природне середовище є вразливим до антропогенного навантаження. Чернігівська область, яка значною частиною знаходиться у басейні річки Десна, характеризується складною та високодиференційованою гідрологічною структурою, густою мережею малих річок, приток і заплавної екосистем. Малі річки пониззя Десни відіграють значну роль у формуванні водного балансу польського регіону, забезпечуючи підтримання гідрологічного режиму основного русла, живлення підземних вод і формування екосистемних послуг, пов'язаних із водопостачанням, біорізноманіттям і регулюванням мікроклімату [2]. Водночас упродовж останніх десятиліть (кінець ХХ ст. – початок ХХІ ст.) спостерігається істотна деградація цих водних об'єктів, спричинена антропогенним навантаженням, зокрема, інтенсивною меліорацією, розорюванням заплав, надмірним використанням пестицидів, неочищеними стічними водами, вирубуванням заплавної лісів і прибережних захисних смуг і проявами зміни клімату [3]. Наслідком цих процесів є зниження водності, замулення русел, втрата біорізноманіття та деградація природних ландшафтів, що становить загрозу екологічній стійкості всього басейну Десни.

У процесі формування стратегій розвитку територіальних громад Чернігівщини екологічний компонент часто залишається другорядним або представлений фрагментарно, без врахування гідрологічної специфіки територій. Як наслідок – у стратегічних документах бракує аналізу екологічних ризиків, прогнозування впливу планованої діяльності на стан водних екосистем, а заходи з охорони довкілля здебільшого мають декларативний характер. Це свідчить про недостатню інтеграцію СЕО у систему стратегічного планування на місцевому рівні.

Ураховуючи зазначене, дослідження ролі стратегічної екологічної оцінки у формуванні стратегій розвитку територіальних громад Чернігівської області з позицій збереження екологічного стану малих річок Десни є надзвичайно важливим. Воно спрямоване на виявлення проблемних аспектів існуючої практики, формування науково обґрунтованих пропозицій щодо вдосконалення механізмів проведення СЕО та інтеграції її результатів у стратегічне планування розвитку громад.

Таким чином, мета статті полягає у визначенні ролі стратегічної екологічної оцінки як інструменту забезпечення екологічної збалансованості стратегій розвитку територіальних громад Чернігівщини, з врахуванням екологічного стану малих річок пониззя Десни, а також у розробленні практичних підходів до підвищення ефективності цього процесу. *Ключові слова:* стратегічна екологічна оцінка, стратегічне планування, стратегії розвитку територіальних громад, Чернігівське Полісся, малі річки пониззя Десни, екологічний стан водних ресурсів, басейновий підхід, участь громадськості, стійкий розвиток, екологічне управління.

The role of strategic environmental assessment in forming development strategies of territorial communities of Chernihiv region taking into account the ecological state of small rivers lower reaches of the Desna. Karpenko Yu., Ivus T.

Ukraine is currently undergoing deep structural changes encompassing mechanisms of spatial development governance, the rational use of natural resources, and environmental protection. In the context of decentralization, the territorial communities are becoming the primary agents for implementing state sustainable development policy, establishing strategic priorities, and managing natural-resource potential. In this regard, the necessity of integrating ecological approaches into the strategic planning and territorial development processes becomes especially important, aligning with European standards.

One of the key instruments for ensuring the ecological orientation of strategic decisions is Strategic Environmental Assessment (SEA), introduced in Ukraine pursuant to the Law of Ukraine “On Strategic Environmental Assessment” of 20 March 2018 [1]. SEA is intended to ensure that environmental consequences are taken into account already at the stage of drafting state planning documents – strategies, programmes, schemes, and territorial development plans. Thus, it functions not only as a procedure for assessing impacts but also as a tool for preventing environmental risks, and for enhancing the transparency and quality of governance decisions.

The issue of conducting SEA becomes particularly relevant in regions where the natural environment is vulnerable to anthropogenic pressures. Chernihiv region, much of which lies within the Desna River basin, is characterised by a complex and highly differentiated hydrological structure, a dense network of small rivers, tributaries, and floodplain ecosystems. The small rivers of the lower Desna reaches play a significant role in forming the water balance of the Polissia region, maintaining the hydrological regime of the main river channel, recharging groundwater, and delivering ecosystem services related to water supply, biodiversity conservation, and climate regulation [2]. At the same time, over recent decades (late 20th to early 21st century) there has been substantial degradation of these water bodies, driven by anthropogenic load—particularly intensive land reclamation, ploughing of floodplains, excessive pesticide use, untreated wastewater, clearing of floodplain forests and riparian buffer zones, and manifestations of climate change [3]. The consequences of these processes include reduced water flow, siltation of riverbeds, loss of biodiversity, and degradation of natural landscapes, all of which pose a threat to the ecological sustainability of the entire Desna's basin.

In the process of developing strategies for the territorial communities of Chernihiv region, the environmental component often remains secondary or is represented only fragmentarily, without regard to the hydrological specificity of the territories. As a consequence, strategic documents lack analysis of environmental risks, forecasting of the impacts of planned activities on the condition of aquatic ecosystems, and environmental protection measures are mostly declarative in nature. This indicates inadequate integration of SEA into the strategic planning system at the local level.

Given the above, the study of the role of SEA in shaping development strategies of territorial communities in Chernihiv region from the perspective of preserving the ecological status of the small rivers of the lower Desna is extremely important. The study aims to identify problematic aspects of current practice, and to formulate scientifically grounded proposals for improving the mechanisms for conducting SEA and integrating its results into community strategic planning.

Thus, the objective of the article is to determine the role of Strategic Environmental Assessment as a tool for ensuring ecological balance in the development strategies of territorial communities in Chernihiv region, taking into account the ecological condition of the small rivers in the lower reaches of the Desna, and to develop practical approaches for increasing the effectiveness of this process. *Key words:* strategic environmental assessment, strategic planning, territorial community development strategies, Chernihiv Polissia, small rivers lower reaches of the Desna river, ecological status of water resources, river basin approach, public participation, sustainable development, environmental management.

Постановка проблеми. У сучасних умовах децентралізації та євроінтеграційного курсу України територіальні громади отримали розширені повноваження у сфері стратегічного планування та управління природними ресурсами. Однак процес розроблення стратегій розвитку громад нерідко відбувається без належного урахування екологічних чинників, що зумовлює ризики деградації природних екосистем, особливо водних. Малі річки пониззя Десни, які формують значну гідрологічну мережу Чернігівщини, зазнають значного антропогенного навантаження внаслідок нераціонального землекористування, забруднення та зміни руслових процесів. У цих умовах СЕО постає ключовим інструментом забезпечення збалансованого розвитку територій, спрямованим на інтеграцію екологічних пріоритетів у систему управлінських рішень на рівні громад.

Актуальність дослідження. Процеси передачі повноважень громадам і наближення до стандартів Європейського Союзу, а також забезпечення екологічної збалансованості стратегічного планування територіальних громад набувають ключового значення в сучасних умовах. Незважаючи на обов'язковість проведення стратегічної екологічної оцінки, у практиці місцевого управління цей процес часто носить формальний характер, що призводить до переважання економічних рішень над екологічними пріоритетами.

Для Чернігівської області, значна частина якої охоплює басейн річки Десна, така ситуація створює ризики деградації малих річок і заплавної екосистем, які забезпечують водний баланс та біорізноманіття регіону. Додатковим викликом є умови воєнного стану, у яких функціонує область як прикордонна прифронтна територія. Це ускладнює

реалізацію екологічної політики, обмежує ресурси місцевих громад і водночас підвищує потребу в інтеграції екологічних аспектів у процеси відновлення та стратегічного планування.

Дослідження ролі СЕО у формуванні стратегій розвитку громад Чернігівщини узгоджується з положеннями Програми охорони навколишнього природного середовища Чернігівської області на 2021–2027 рр. [4], Державної стратегії регіонального розвитку до 2027 року [5], Стратегії державної екологічної політики України до 2030 року [6], Водної стратегії України на період до 2050 року [7], Водної Рамкової Директиви [8], а також Цілями сталого розвитку ООН, що визначає його високу наукову та практичну значущість [9].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження узгоджується з пріоритетами державної, регіональної та міжнародної екологічної політики, спрямованої на досягнення Цілей сталого розвитку ООН (зокрема Цілей 6 «Чиста вода та належні санітарні умови», 11 «Стійкі міста і громади» та 13 «Боротьба зі зміною клімату») [9]. Авторський доробок відповідає завданням, визначеним у Державній стратегії екологічної політики України до 2030 року [10], Державній стратегії регіонального розвитку України до 2027 року [5], а також у Стратегії розвитку Чернігівської області на період до 2027 року [11], де серед ключових пріоритетів визначено охорону водних ресурсів, збереження природних екосистем та адаптацію до кліматичних змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню особливостей впровадження, визначення, проблематики СЕО присвячено праці багатьох зарубіжних та українських вчених, серед

яких Є. Хлобистов, А. Решетченко, В. Карамушка, Б. Данилишин, Г. Марушевський, Т. Козаченко, В. Садлер та ін. [12; 13; 14; 15; 16; 17; 18].

Водночас, питання інтеграції результатів SEO у стратегії розвитку територіальних громад, особливо в умовах післявоєнної відбудови регіонів, залишаються малодослідженими та актуальними.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На сьогодні бракує комплексних науково-практичних підходів, що поєднують стратегічне планування розвитку територіальних громад із результатами SEO. Відсутній дієвий механізм урахування висновків SEO у прийнятті рішень щодо використання земель водоохоронних зон, відновлення малих річок і формування природоохоронної інфраструктури. Недостатньо розроблені методики оцінки кумулятивного впливу місцевих програм на стан водних об'єктів. Проблемним залишається й питання участі громадськості у процесі SEO, що знижує рівень прозорості й підзвітності влади. Особливої уваги потребує розроблення практичних рекомендацій щодо інтеграції SEO у стратегії розвитку громад у межах території пониззя Десни, з урахуванням специфіки басейнової структури та екологічної чутливості малих річок.

Новизна. Незважаючи на те, що відповідно до Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку» процедура SEO є обов'язковою для документів державного планування, на практиці її екологічний компонент часто залишається формальним, а стратегічні рішення формується переважно з урахуванням економічних пріоритетів, без системного врахування екологічних ризиків та стану водних екосистем. Особливо критичним є ігнорування малих річок пониззя Десни, які відіграють значну роль у підтриманні гідрологічного режиму, збереженні біорізноманіття та забезпеченні екосистемних послуг регіону.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні комплексного науково-практичного підходу, який підвищує роль SEO як ефективного інструменту екологічного управління на місцевому рівні та забезпечує інтеграцію достовірних даних про стан водних об'єктів у процес формування стратегій розвитку територіальних громад. Таким чином, запропонований підхід формує цілісну, адаптивну і практично застосовну модель SEO, що дозволяє системно враховувати екологічні пріоритети у стратегічному плануванні Чернігівської області, підвищуючи ефективність управління водними ресурсами та забезпечуючи збереження екосистемних функцій малих річок пониззя Десни.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічною основою дослідження є системний і басейновий підходи, принципи інтегрованого управління природними ресурсами, концепція сталого розвитку територій. Використано методи аналізу нормативно-правових актів, порівняльно-право-

вий, геоінформаційний аналіз, експертне оцінювання екологічного стану водних об'єктів.

Отримані результати можуть стати основою для розроблення методичних рекомендацій щодо проведення стратегічної екологічної оцінки стратегій розвитку територіальних громад з урахуванням екологічного стану малих річок, що сприятиме ухваленню екологічно збалансованих управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. Стратегічна екологічна оцінка у сучасних умовах трансформації системи управління довкіллям в Україні постає не лише інструментом виконання міжнародних зобов'язань, а й ключовим елементом ефективного стратегічного планування сталого розвитку територіальних громад. SEO здатна забезпечити баланс між соціально-економічними інтересами та екологічною безпекою регіонів. Її значення особливо зростає у контексті регіонів, де екологічна ситуація безпосередньо впливає на якість життя населення, як це спостерігається на території Чернігівської області, зокрема у пониззі Десни – басейнової системі з високим рівнем антропогенного навантаження та деградацією малих річок.

В умовах Чернігівської області стратегічна екологічна оцінка має забезпечувати науково обґрунтовану інтеграцію екологічних пріоритетів у процес стратегічного планування розвитку територіальних громад. На практиці її реалізація часто носить формальний характер: звіт SEO готується переважно як документ для виконання законодавчої вимоги, громадські обговорення відбуваються номінально, а подальший моніторинг стану довкілля є малореалізованим. Це створює ризики недостатнього врахування екологічного стану малих річок пониззя Десни та деградації водних екосистем та їх біорізноманіття.

Для подолання цих проблем запропоновано комплекс науково-практичних підходів, які дозволяють перетворити SEO на ефективний механізм екологічного управління на місцевому рівні (рис. 1).

Інтеграційний підхід передбачає, що результати SEO повинні безпосередньо враховуватися на всіх етапах формування стратегій розвитку громад. Звіт SEO стає основою для прийняття рішень у сферах землекористування, природоохоронних заходів та соціально-економічного розвитку. Такий підхід забезпечує баланс між економічними, соціальними та екологічними інтересами, дозволяючи прогнозувати та мінімізувати негативний вплив на малі річки і запобігати деградації водних екосистем.

Басейновий підхід фокусується на збереженні природної цілісності водних систем, розглядаючи річки та їхні притоки як єдині екологічні одиниці. Це дає змогу оцінювати кумулятивний вплив різних заходів на водні об'єкти, координувати дії суміжних громад та розробляти комплексні програми підтримки гідрологічного режиму, вивчення і збереження біорізноманіття та розбудови природоохоронної інфраструктури. У контексті малих річок пониззя

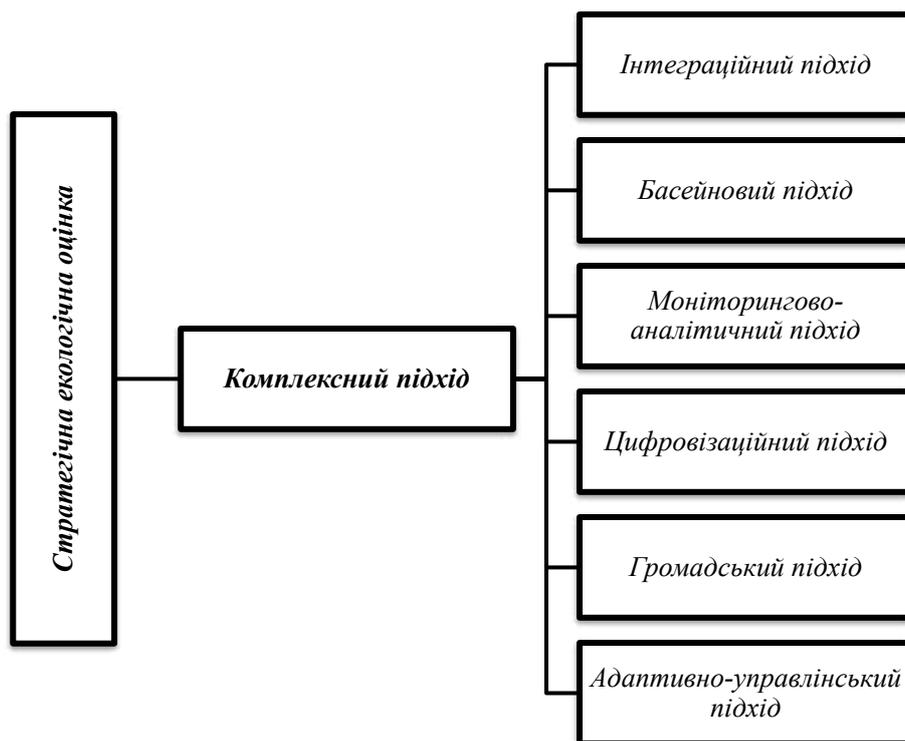


Рис. 1. Науково-практичні підходи для покращення механізму СЕО

Десни цей підхід сприяє уникненню фрагментарності управління водними ресурсами та забезпечує сталий розвиток території.

Моніторингово-аналітичний підхід передбачає систематичний збір даних про стан малих річок, заплав і прибережних смуг, включаючи водність, якість води, стан русел та біорізноманіття. Інформація, отримана в результаті моніторингу, є основою для підготовки звіту СЕО та формування науково обґрунтованих рекомендацій. Практичне застосування цього підходу дозволяє оцінювати ефективність заходів, оперативно реагувати на негативні тенденції та коригувати стратегії розвитку громад.

Цифровізаційний підхід передбачає використання сучасних інформаційних технологій для інтеграції та обробки екологічних даних. Створення геоінформаційних систем, баз даних і онлайн-платформ для відстеження стану водних об'єктів дозволяє органам влади та громадам оперативно отримувати актуальну інформацію, оцінювати вплив планованих заходів і забезпечувати прозорість даних для громадськості.

Громадський підхід акцентує на активному залученні населення до обговорення звітів СЕО та стратегій розвитку. Участь громади дозволяє врахувати локальні екологічні пріоритети, підвищити підзвітність органів влади та сприяти формуванню екологічної свідомості населення. Реалізація цього підходу гарантує, що стратегічні рішення враховують інтереси та потреби громад, зокрема щодо збереження малих річок пониззя Десни та їх природних компонентів.

Адаптивно-управлінський підхід передбачає, що СЕО не обмежується одноразовою підготовкою звіту. Результати моніторингу використовуються для корекції стратегічних рішень, уточнення заходів з охорони довкілля та адаптації планів розвитку до змін стану водних екосистем. Це забезпечує безперервний процес управління, спрямований на підтримку екологічної стійкості та сталого розвитку громад.

Комплексний підхід до реалізації СЕО поєднує всі зазначені елементи у єдину систему: стратегія розвитку громади розробляється з урахуванням наукових даних, звіт СЕО готується як обґрунтований документ, громадськість активно залучається до обговорення, стратегія та звіт затверджуються як документи державного планування, а подальший моніторинг забезпечує контроль і адаптацію.

Такий підхід перетворює СЕО з формальної процедури на реальний механізм екологічного управління, сприяючи збереженню малих річок пониззя Десни та підвищенню екологічної стійкості Чернігівської області.

Головні висновки. Стратегічна екологічна оцінка виступає ключовим інструментом інтеграції екологічних пріоритетів у процес стратегічного планування розвитку територіальних громад, забезпечуючи узгодження соціально-економічних цілей із принципами сталого природокористування. Для Чернігівської області, значна частина якої охоплює басейн річки Десна, така оцінка має особливе значення через деградацію малих річок і вразливість

природних екосистем. На практиці СЕО часто реалізується формально, що знижує ефективність стратегічних документів і не дозволяє своєчасно виявляти екологічні ризики. Запропонований у дослідженні комплексний підхід – інтеграційний, басейновий, моніторингово-аналітичний, цифровізаційний і громадський – спрямований на перетворення СЕО на дієвий механізм екологічного управління та запобігання деградації водних екосистем басейну Десни.

В умовах воєнного стану, коли Чернігівська область функціонує як прикордонна, прифронтна територія, роль СЕО зростає як інструменту післявоєнного відновлення, забезпечення екологічної безпеки та підвищення стійкості територій. Реалізація результатів дослідження сприятиме створенню ефективної системи екологічного планування на рівні громад, удосконаленню механізмів участі громадськості, залученню міжнародної допомоги та впрова-

дженню європейських стандартів сталого розвитку у процес стратегічного управління Чернігівщиною.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування для вдосконалення стратегій розвитку територіальних громад Чернігівщини, зокрема при розробленні розділів, пов'язаних з управлінням природними водними ресурсами та кліматичною адаптацією. Практичне впровадження запропонованих підходів до інтеграції СЕО сприятиме створенню ефективної системи екологічного планування на рівні громад, а також залученню міжнародної допомоги для відновлення малих річок.

У контексті воєнного стану та майбутньої післявоєнної відбудови регіону результати дослідження можуть стати основою для розроблення програм екологічного відновлення малих річок і заплавної екосистем, залучення міжнародних екологічних фондів та партнерів ЄС.

Література

1. Про стратегічну екологічну оцінку : Закон України від 20.03.2018 р. № 2354-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2354-19#Text> (дата звернення: 09.10.2025).
2. Сердюк С.М., Луньова О.В., Агєєва О.Ф., Кам'янська В.О. Малі річки України: гео-екологічний огляд проблем. *Вісник Донецького гірничого інституту*. 2017. № 1. С. 101-106.
3. Хімко Р.В., Мережко О.І., Бабко Р.В. Малі річки – дослідження, охорона, відновлення. Київ : Інститут екології, 2003. 378 с.
4. Програма охорони навколишнього природного середовища Чернігівської області на 2021–2027 роки: рішення 21-ї сесії Чернігівської обласної ради VII скликання від 18.12.2019 № 4-21/VII зі змінами. URL: <https://eco.cg.gov.ua/index.php?id=33874&tp=1&pg=> (дата звернення: 09.10.2025)
5. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки: постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#Text> (дата звернення: 08.10.2025).
6. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 09.10.2025).
7. Водна стратегія України на період до 2050 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 р. № 1134-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 10.10.2025)
8. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення. К.: Твій формат, 2006. 240 с.
9. Про цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 08.10.2025).
10. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 09.10.2025).
11. Стратегії сталого розвитку Чернігівської області на період до 2027 року, затвердженої рішенням Чернігівської обласної ради від 18.12.2019 № 4-21/VII (в редакції рішення Чернігівської обласної ради від 14.03.2025 № 3-22/VIII)
12. Хлобистов Є. Стратегічна екологічна оцінка для запобігання конфліктам експертний погляд. *Журнал Економіст*. К., 2016. URL: <http://ua-ekonomist.com/12127-strategchna-ekologchna-ocnka-dlya-zapobgannyakonfliktv-ekspertnyi-poglyad.html> (дата звернення: 09.10.2025).
13. Решетченко А.І., Шаповалов О.І. Особливості стратегічної екологічної оцінки територій селищних громад як механізму сприяння сталому розвитку. *Геохімія техногенезу*. 2022. Вип. 8. С. 52-58. DOI <https://doi.org/10.32782/geotech2022.36.08>
14. Карамушка В.І. Екологічна збалансованість стратегічних ініціатив і проєктів (інтегрування довільних аспектів у стратегічне планування та проєктну діяльність) : практич. посібник К. : К.І.С., 2012. 138 с.
15. Данилишин Б.М., Хлобистов Є.В. Стратегічна екологічна оцінка управлінських рішень щодо формування та реалізації регіональної політики Збалансований розвиток України – шлях до здоров'я та добробуту нації: матер. *Укр. еколог. конгр.*, 21 верес. 2007 р. К.: Центр екологічної освіти та інформації, 2007. С. 24-25.
16. Марушевський Г.Б. Стратегічна екологічна оцінка : навч. посіб. з компакт-диском К. : К.І.С., 2014. 88 с.
17. Козаченко Т.П. Стратегічна екологічна оцінка в Україні: проблеми та перспективи. *Інвестиції: практика та досвід*. 2018. № 16. С. 98-101.
18. Sadler B. Environmental Assessment In A Changing World: Evaluating Practice to Improve Performance. International Study of the Effectiveness of Environmental Assessment. Final Report. Minister of Supply and Services Canada, 1996. 263 p.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЗАПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ РАНЬОГО ПОПЕРЕДЖЕННЯ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО ВИЯВЛЕННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Крайнюков О.М., Щокіна М.М.

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

У даному дослідженні проведено аналіз міжнародного досвіду впровадження систем раннього попередження при проведенні безперервного моніторингу якості поверхневих вод. Протягом останніх 15-20 років зростаюча обізнаність про антропогенні зміни водного середовища призвела до пошуку чутливих та екологічно значущих індикаторів впливу та сигналів раннього попередження на різних рівнях біологічної інтеграції, від субклітинної біофізики та біохімії до функціонування екосистеми. Окрім своєї ролі в фундаментальній екології, інтегративна поведінкова реакція цілого організму вже давно використовується в токсикології та фармакології ссавців. Однак для її використання в оцінці впливу фізичних та хімічних змін навколишнього середовища на тваринах були потрібні ширші екологічно орієнтовані концепції та нові кількісні методи, які зараз розробляються. Нещодавні технічні та методологічні досягнення включають цифровізацію миттєвих реакцій та комп'ютеризований аналіз відеозображень, що надає можливість для сучасного поведінкового тестування та впровадження систем раннього попередження у водоохоронну практику в різних країнах світу. Поведінка тест-об'єктів є сполучною ланкою між організмами та їхнім середовищем мешкання і має вирішальне значення для біологічної адаптації. Незважаючи на численні дослідження, що демонструють чутливість та корисність поведінкових кінцевих точок у біологічних аналізах, що оцінюють потенційний вплив забруднювачів у водних екосистемах, тестування поведінкової токсичності за допомогою систем раннього попередження історично не включалося до оцінок водної токсичності та подальшого формування екологічної політики. Результати оцінок поведінкового ризику можуть дозволити продемонструвати, що хімічна речовина є не просто потенційно небезпечною, а й викликає функціональні зміни у тварини. У цьому відношенні фахівці мають підстави, рекомендують дії не на основі ізольованих, нефункціональних змін, таких як гостра або хронічна токсичність. Сублетальні ефекти забруднювачів повинні викликати великий інтерес та занепокоєння у фахівців, які розробляють екологічну політику та критерії якості води, оскільки набагато більше водних організмів стикаються з сублетальними, а не гостро або хронічно летальними концентраціями забруднювачів у природі. *Ключові слова:* забруднення вод, токсичні властивості води, тест-об'єкт, біологічний моніторинг, біотестування, системи раннього попередження.

Implementation of an early warning system for the rapid detection of pollution of water bodies. Krainiukov O., Shchokina M.

This study reviews international experience in implementing early warning systems for continuous monitoring of surface water quality. Over the past 15-20 years, increasing awareness of anthropogenic changes in the aquatic environment has led to the search for sensitive and ecologically relevant impact indicators and early warning signals at different levels of biological integration, from subcellular biophysics and biochemistry to ecosystem functioning. In addition to its role in fundamental ecology, integrative whole-organism behavioral response has long been used in mammalian toxicology and pharmacology. However, its use in assessing the impact of physical and chemical environmental changes on animals required broader ecologically oriented concepts and new quantitative methods, which are currently being developed. Recent technical and methodological advances include the digitization of instantaneous reactions and computerized analysis of video images, which provide an opportunity for modern behavioral testing and the implementation of early warning systems in water conservation practice in different countries of the world. Behavior of test subjects is the link between organisms and their environment and is crucial for biological adaptation. Despite numerous studies demonstrating the sensitivity and utility of behavioral endpoints in biological assays that assess the potential impact of pollutants in aquatic ecosystems, behavioral toxicity testing has historically not been included in aquatic toxicity assessments and subsequent environmental policy development. The results of behavioral risk assessments can demonstrate that a chemical is not only potentially hazardous but also causes functional changes in the animal. In this regard, experts are justified in recommending action not based on isolated, non-functional changes such as acute or chronic toxicity. Sublethal effects of pollutants should be of great interest and concern to specialists who develop environmental policies and water quality criteria, since many more aquatic organisms are exposed to sublethal rather than acutely or chronically lethal concentrations of pollutants in nature. *Key words:* water pollution, toxic properties of water, test object, biological monitoring, biotesting, early warning systems.

Постановка проблеми. У 2020 році лише в ЄС було зареєстровано для комерційного використання 29 000 унікальних хімічних речовин, а прогнозується, що світове виробництво хімічних речовин подвоїться між 2017 і 2030 роками [1, 2]. Дослідники стверджують, що таке масштабне виробництво хімічних речовин перевищує безпечний для планети робочий простір та перевищує можливості суспіль-

ства проводити відповідні оцінки безпеки [3]. Крім того, багато з цих хімічних речовин спеціально розроблені для впливу на біологічні системи, знаходячись застосування в біоцидах та фармацевтичних препаратах. Визначено, що 62% загального споживання хімічних речовин в ЄС еквівалентно 345 мільйонам тонн і було класифіковано як такі, що становлять небезпеку для здоров'я [2].

Виробництво, використання та утилізація хімічних речовин регулюються національними та міжнародними органами захисту довкілля та здоров'я людини. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі, що діє в рамках Програми ООН з навколишнього середовища, набула чинності у 2004 році [4] та регулює хімічні речовини, які є стійкими, біоаккумулятивними, токсичними та підлягають особливого поводження. Однак, хоча обмеження щодо хімічних речовин є важливим інструментом управління ризиками, вони зазвичай часто мають не прогнозований характер. Хоча програма REACH [1] має на меті запобігти широкому використанню проблемних хімічних речовин, постійні приклади випадків забруднення та впливу свідчать про недоліки або неефективність, такі як глобальна проблема забруднення поверхневих вод важкими металами, що становить значний ризик для здоров'я людини, оскільки ці токсичні метали можуть накопичуватися в живих організмах з часом [5]. Важкі метали в поверхневих водах можуть потрапляти в організм людини різними шляхами, включаючи пиття, всмоктування через шкіру та проковтування забруднених ними продуктів [6].

Крім того, обмеження часто не враховують усі потенційні ризики, пов'язані з хімічними сумішами. Зрештою, обмеження хімічних речовин може супроводжуватися їх заміною потенційно невдалими альтернативами, які можуть створювати подібні небезпеки або погано вивчені ризики [7].

Отже, існує потреба у виявленні потенційних екологічних проблем, пов'язаних з виробництвом та використанням хімічних речовин і їх небезпечним впливом на водні екосистеми. Більшість дослідницьких ініціатив зосереджені на виявленні забруднюючих речовин, що викликають занепокоєння, використовуючи методи експериментального скринінгу [8, 9]. Нещодавні досягнення в аналітичній хімії дозволили проводити більш точні, вибіркові та чутливі кількісні визначення хімічного забруднення, проте інформація про токсичність хімічних сумішей та їх біодоступність часто відсутня під час хімічного скринінгу [10].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок поєднує фундаментальні наукові дослідження (екотоксикологія, поведінковий аналіз, інноваційні методики) з практичними викликами (моніторинг води, захист довкілля, охорона здоров'я людини).

Цей зв'язок особливо цінний, оскільки він: спрямований на створення більш оперативних і чутливих систем контролю; пропонує міждисциплінарний підхід (екологія + біологія + ІТ + інженерія); має значення для державної екологічної політики і сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загальна мета систем раннього попередження (СРП) полягає в ранньому виявленні потенційно проблемного забруднення хімічною речовиною чи сумішшю речовин,

що фіксує сигнал тривоги, після чого з мінімальною затримкою можна провести більш спеціалізовані дослідження та/або регуляторні заходи. Хоча СРП широко застосовуються для виявлення стихійних лих, їх застосування в оцінці хімічної безпеки та ризику є менш поширеним. Метою СРП є запровадження можливостей для оперативного виявлення загроз забруднення води водних об'єктів, в ідеалі в будь-якому компоненті середовища без значних затримок.

З цією метою СРП, ймовірно, охоплюватиме низку інструментів та методів оцінки, з використанням на першій стадії біологічних тест-організмів, впроваджених для оперативного виявлення токсикогенного забруднення води водних об'єктів різними джерелами забруднення. Головна задача цієї системи полягає у виявленні шкідливих хімічних речовин та ситуацій, які можуть спричинити негативний вплив на здоров'я людини або навколишнє середовище, на якомога ранній стадії. СРП повинна бути розроблена для передачі інформації відповідним органам, забезпечуючи якомога швидше вжиття відповідних заходів [11].

Системи СРП повинні мати можливість аналізувати та обробляти сигнали з місця подій як вхідні дані, потенційно в режимі реального часу. Враховуючи, що нові небезпеки можуть виникати в будь-який час або після тривалих періодів латентності, для виявлення сигналів знадобиться стратегія оперативного моніторингу в просторі та часі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У сучасній екотоксикології та практиці біомоніторингу залишається низка невирішених проблем та аспектів, які зумовлюють необхідність подальших експериментальних досліджень. Зокрема, недостатньо розроблені кількісні критерії оцінки поведінкових реакцій гідробіонтів як індикаторів токсичної дії, що обмежує можливості їх широкого застосування. Суттєвою проблемою біологічних систем раннього попередження є зниження надійності через хибні сигнали, пов'язані як із технічними факторами впливу, так і з природною варіабельністю живих організмів. Відсутність універсальних стандартів методичного забезпечення ускладнює порівняльність і відтвореність результатів між різними лабораторіями. Крім того, наявні інструментальні методи хімічного аналізу не дозволяють у повній мірі врахувати комплексний вплив сумішей забруднюючих речовин. Недостатньо інтегрованими залишаються й сучасні цифрові технології, які здатні підвищити точність інтерпретації поведінкових даних. Усі ці прогалини окреслюють важливі напрями наукового пошуку, яким і присвячено дане дослідження.

Новизна. У роботі вперше здійснено комплексний аналіз можливостей застосування поведінкових реакцій гідробіонтів як чутливих індикаторів токсичної дії у системах біологічного моніторингу. Запропоновано методологічні підходи до кількісної оцінки поведінкових параметрів, що підвищує об'єк-

тивність та відтворюваність результатів у порівнянні з традиційними якісними спостереженнями. Удосконалено підхід до функціонування біологічних систем раннього попередження шляхом інтеграції поведінкових тестів із цифровими технологіями відеоаналізу та алгоритмами статистичної обробки, що дозволяє мінімізувати кількість хибних тривог і підвищити надійність роботи систем.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження формує новий методологічний підхід до використання поведінкових реакцій гідробіонтів у біомоніторингу, переводячи їх у площину кількісної оцінки та стандартизації. Інтеграція цифрових технологій і статистичних алгоритмів у біологічні системи раннього попередження підвищує точність та надійність екологічного контролю. Робота має загальнонаукове значення, оскільки сприяє розвитку поведінкової екотоксикології як перспективного наукового напрямку.

Викладення основного матеріалу. Створення сільськогосподарських угідь та промислових об'єктів поблизу прісноводних водойм та водотоків збільшило ризик хімічного забруднення озер та річок у різних країнах світу. Згідно з опитуванням, проведеним серед 153 постачальників води у Сполучених Штатах та Канаді, найпоширенішими причинами забруднення води були транспортні аварії, витоки з трубопроводів та резервуарів для зберігання, пестициди із сільськогосподарських стоків та патогенні мікроби, які потрапляють у водні об'єкти з неочищеними стічними водами [12]. Тільки в Онтаріо, Канада, у 2009 році було зареєстровано 1162 розливи у водні системи, з яких 595 випадків, як було підтверджено, спричинили значний вплив на навколишнє середовище [12]. Щоб пом'якшити вищезазначені ризики, Агентство з охорони навколишнього середовища США рекомендувало встановити системи раннього попередження, оснащені онлайн-датчиками, для швидкого виявлення будь-яких шкідливих агентів, включаючи хімічні забруднювачі. Однак, сучасні хімічні сенсори все ще стикаються з низкою технологічних та логістичних обмежень, включаючи нездатність виявляти широкий спектр забруднюючих речовин [13], і тому оцінка безпеки води повинна проводитися безпосередньо на водному об'єкті в режимі реального часу.

Щоб доповнити недоліки сучасних технологій хімічного зондування, водні організми можуть бути використані як компоненти системи онлайн-моніторингу для виявлення наявності токсичних хімічних речовин. Подібно до шахтарської канарки, ці організми демонструють швидкі зміни у своїх фізіологічних та поведінкових кінцевих точках при впливі підгострих, швидкодіючих токсикантів [14]. Коли кінцеві точки демонструють статистично значущі відхилення від базових умов, спрацьовує попереджувальний сигнал, щоб повідомити операторів безпеки води про небезпечну ситуацію, і можуть бути вжиті відповідні коригувальні дії. Різні дослідження оцінювали вико-

ристання риб [15–17], ветвистоусих ракоподібних [18, 19], двостулкових молюсків [20, 21] та водоростей [22, 23] для впровадження в різні системи біомоніторингу. Хоча ці дослідження продемонстрували чутливість організмів та їхню швидку реакцію на різні забруднювачі, вищезгадані експерименти тестували лише один тип організмів у відповідній системі біомоніторингу. Ефективна система раннього попередження не може покладатися виключно на один вид, оскільки різні організми можуть демонструвати різний рівень чутливості до одного й того ж забруднювача, також певний вид також може бути надмірно чутливим до природних коливань якості води. Виходячи з вищезазначених зауважень, система біомоніторингу одного виду може потенційно недооцінювати або переоцінювати ризики певних токсикантів.

Спираючись на численні види, можна створити більш надійну систему, яка мінімізує ймовірність хибнопозитивних або хибнонегативних результатів. Різні забруднюючі речовини також можуть викликати унікальну реакцію від кожного організму біомоніторингу, і дослідження, що аналізує різні моделі реакцій, потенційно може дозволити ідентифікувати невідомі забруднюючі речовини.

Системи раннього попередження особливо корисні для виявлення періодичних токсичних впливів у навколишньому середовищі. Безперервна інформація в режимі реального часу про зміни в часі рівнів токсичності важлива для фахівців з охорони навколишнього середовища, які повинні розуміти вплив точкових і неточкових джерел забруднення на водний об'єкт, оцінювати, чи є якість поверхневих вод придатною для використання, або розглядати, чи придатні стічні води з очисних споруд для скиду.

Головні висновки. Результати дослідження свідчать про те, що поведінкові реакції можуть бути сприятливими кінцевими точками для оцінки організмів та екологічних ефектів впливу забруднюючих речовин на навколишнє середовище. Порівняння тривалості дослідження, чутливості, розміру ефекту та статистичної потужності вказує на те, що поведінкові реакції повинні використовуватися ширше і подальші дослідження, повинні бути зосередженими на оптимізації та стандартизації протоколів, які оцінюють поведінку, були б корисними для галузі водної токсикології.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають широкі можливості для практичного застосування у сфері екологічного моніторингу та управління довкіллям. Запропоновані підходи до кількісної оцінки поведінкових реакцій гідробіонтів можуть стати основою для створення нових або вдосконалення наявних біологічних систем раннього попередження з метою оперативного контролю якості питної та поверхневої води. Інтеграція цифрових технологій та алгоритмів аналізу даних дозволяє підвищити чутливість і надійність таких систем, що робить їх

придатними для впровадження у практику промислових підприємств, комунального господарства, а також у державні системи екологічного контролю. Перспективним є також використання напрацьованих методик у навчальному процесі та підготовці

фахівців з екології, токсикології та біоінженерії. У ширшому контексті результати дослідження сприяють розвитку міжнародних стандартів у сфері екологічної безпеки та інтеграції України до світової системи моніторингу довкілля.

Література

1. ECHA, REACH – Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals Regulation – Registered Substances Factsheets, European Chemicals Agency. <https://echa.europa.eu/information-on-chemicals/registered-substances>
2. UNEP, U. (2019). Global Chemicals Outlook II-From Legacies to Innovative Solutions: Implementing the 2030 Agenda for Sustainable Development.
3. Persson L., Almroth B., Collins C. D., Cornell S., de Wit C. A., Diamond M. L., Fantke P., Hassellöv M., MacLeod M., Ryberg M. W., Jørgensen S. P., Villarrubia-Gómez P., Wang Z. Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environ. Sci. Technol.*, 2022. 56(3). pp. 1510-1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158>
4. UNEP. «Stockholm Convention on persistent organic pollutants (POPs) – Text of the Convention.» <https://www.pops.int/TheConvention/Overview/TextoftheConvention/tabid/2232/Default.aspx>
5. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of chemistry*, 2019. 1. pp. 1-14. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
6. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans, *Heliyon*. 2020. 6(9). pp. e04691. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691>
7. Wang Z., Cousins I.T., Scheringer M., Hungerbuehler K. Hazard assessment of fluorinated alternatives to long-chain perfluoroalkyl acids (PFAAs) and their precursors: status quo, ongoing challenges and possible solutions. *Environ. Int.*, 2015. 75. pp. 172-179. https://doi.org/10.4149/neo_2015_022
8. González-Gaya B., Lopez-Herguedas N., Bilbao D., Mijangos L., Iker A. M., Etxebarria N. Suspect and non-target screening: the last frontier in environmental analysis. *Anal. Methods*, 2021. 13(16). pp. 1876-1904. <https://doi.org/10.1039/d1ay00111f>
9. Muir D., Zhang X., de Wit C.A., Vorkamp K., Wilson S. Identifying further chemicals of emerging arctic concern based on 'in silico' screening of chemical inventories. *Emerging Contam.* 2019. 5. pp. 201-210. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2019.05.005>
10. Xiao H., Krauss M., Floehr T., Yan Y., Bahlmann A., Eichbaum K., Brinkmann M., Zhang X., Yuan X. Effect-directed analysis of aryl hydrocarbon receptor agonists in sediments from the Three Gorges Reservoir, China. *Environ. Sci. Technol.*, 2016. 50 (20). pp. 11319-11328. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b03231>
11. European Commission. Study for the Strategy for a Non-toxic Environment of the 7th Environment Action Programme – Final Report Publications Office. 2017.
12. Ontario Ministry of the Environment, Spill Action Centre: 2009 Summary Report, 2010. 8 p. Spills Action Centre : 2009 summary report : Free Download, Borrow, and Streaming : Internet Archive
13. Storey M. V., van der Gaag B., Burns B. P. Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems. *Water Research*, 2011. 45(2), pp. 741-747. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.08.049>
14. van der Schalie W. H., James R. R., Gargan T. P. Selection of a battery of rapid toxicity sensors for drinking water evaluation. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006. 22(1). pp. 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2005.11.019>
15. Wei D., Wang L., Poopal R.-K., Ren Z. IR-based device to acquire real-time online heart ECG signals of fish (*Cyprinus carpio*) to evaluate the water quality. *Environmental Pollution*, 2023. 337. pp. 122564. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122564>
16. Kane A. S., Salierno J. D., Brewer, S. K. Fish models in behavioral toxicology: automated techniques, updates and perspectives. *Methods in aquatic toxicology*, 2005. 2. pp. 559-590. https://www.researchgate.net/publication/300020483_Fish_models_in_behavioral_toxicology
17. Little E. E., Fairchild J. F., DeLonay A. J. Behavioral methods for assessing impacts of contaminants on early life stage fishes. *In American Fisheries Society Symposium*. 1993. 14. pp. 67-76.
18. Gerhardt A., Carlsson A., Ressemann C. A new online biomonitoring system for *Gammarus pulex* (L.) (Crustacea): in situ test below a copper effluent in South Sweden. *Environ. Sci. Technol.*, 1998. Vol. 32 pp. 150-156. <https://doi.org/10.1021/es970442j>
19. Maradona A., Marshall G., Mehrvar M., Pushchak R., Laursen A. E., McCarthy L. H., Bostan V., Kimberley A. Utilization of multiple organisms in a proposed early-warning biomonitoring system for real-time detection of contaminants: preliminary results and modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 2012. Vol. 219–220. pp. 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.064>
20. Amiard-Triquet C. Behavioral Disturbances: The Missing Link between Sub-Organismal and Supra-Organismal Responses to Stress? Prospects Based on Aquatic Research. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2009. Vol. 15(1). pp. 87–110. <https://doi.org/10.1080/10807030802615543>
21. Gerhardt A. Aquatic Behavioral Ecotoxicology-Prospects and Limitations. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2007. Vol. 13(3), pp. 481–491. <https://doi.org/10.1080/10807030701340839>
22. Twist H., Edwards A. C., Codd G. A. A novel in-situ biomonitor using alginate immobilised algae (*Scenedesmus subspicatus*) for the assessment of eutrophication in flowing surface waters. *Water Research*, 1997. 31(8). pp. 2066-2072. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00035-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00035-3)
23. van der Schalie W. H., Shedd T. R., Knechtges P. L., Widder M. W. Using higher organisms in biological early warning systems for real-time toxicity detection, *Biosensors and Bioelectronics*, 2001. 16(7–8). pp. 457-465. [https://doi.org/10.1016/S0956-5663\(01\)00160-9](https://doi.org/10.1016/S0956-5663(01)00160-9)

Дата першого надходження рукопису до видання: 08.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЛАНДШАФТНО-МОРФОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ВОДОЗБІРНИХ БАСЕЙНІВ ПРИТОК Р. ТЕТЕРІВ НА ОСНОВІ SRTM DEM

Курило С.М., Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Назаренко О.В.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
ke_miyu@ztu.edu.ua

Дослідження спрямоване на комплексний ландшафтно-морфометричний аналіз водозбірних басейнів приток річки Тетерів з використанням цифрових моделей рельєфу SRTM DEM для виявлення закономірностей ландшафтно-диференціації території Житомирського Полісся. Актуальність роботи обумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих підходів до оцінки морфоструктурних особливостей річкових систем у контексті ландшафтного планування та раціонального природокористування. Дослідження базується на комплексному морфометричному аналізі водозбірних басейнів річок Тетерів, Кам'янка та Гнилоп'ять із застосуванням сучасних геоінформаційних технологій та квантитативних методів аналізу цифрових моделей рельєфу. Запропоновано методологічний підхід, що включає п'ять ключових етапів: отримання та попередню обробку SRTM DEM даних, обробку цифрових моделей рельєфу для морфометричного аналізу, автоматизоване розмежування водозбірних басейнів, обчислення морфометричних параметрів та інтерпретацію результатів у контексті ландшафтно-диференціації. Виявлено значну морфометричну диференціацію досліджуваних басейнів, що відображає різні стадії геоморфологічного розвитку та ландшафтно-екологічні умови. Встановлено, що коефіцієнт компактності варіює від $1,84 \pm 0,03$ для басейну Кам'янки до $2,15 \pm 0,05$ для басейну Тетерів, асиметрія басейнів змінюється від $0,48 \pm 0,02$ до $0,71 \pm 0,04$, а гіпсометричний інтеграл коливається в межах $0,35 \pm 0,02 - 0,42 \pm 0,01$. Результати дослідження мають важливе практичне значення для ландшафтного планування, оптимізації водогосподарської діяльності, екологічного моніторингу та розробки заходів з охорони водних ресурсів у басейновій системі річки Тетерів, а також створення системи екологічно збалансованого природокористування в межах Житомирського Полісся. *Ключові слова:* морфометричний аналіз, водозбірні басейни, SRTM DEM, ландшафтна диференціація, коефіцієнт компактності, гіпсометричний інтеграл, річка Тетерів, Житомирське Полісся.

Landscape-morphometric analysis of catchment basins of the Teteriv River tributaries based on SRTM DEM. Kurylo S., Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Nazarenko O.

The research aims to conduct a comprehensive landscape-morphometric analysis of catchment basins of the Teteriv River tributaries using SRTM DEM digital elevation models to identify patterns of landscape differentiation in the Zhytomyr Polissia territory. The relevance of this work is determined by the necessity to develop scientifically grounded approaches for assessing morphostructural features of river systems in the context of landscape planning and rational nature management. The study is based on comprehensive morphometric analysis of the Teteriv, Kamianka, and Hnylopiat river catchment basins using modern geoinformation technologies and quantitative methods for digital elevation model analysis. A methodological approach including five key stages is proposed: acquisition and preprocessing of SRTM DEM data, processing of digital elevation models for morphometric analysis, automated delineation of catchment basins, calculation of morphometric parameters, and interpretation of results in the context of landscape differentiation. Significant morphometric differentiation of the studied basins was revealed, reflecting different stages of geomorphological development and landscape-ecological conditions. It was established that the compactness coefficient varies from 1.84 ± 0.03 for the Kamianka basin to 2.15 ± 0.05 for the Teteriv basin, basin asymmetry changes from 0.48 ± 0.02 to 0.71 ± 0.04 , and the hypsometric integral fluctuates within $0.35 \pm 0.02 - 0.42 \pm 0.01$. The research results have important practical significance for landscape planning, optimization of water management activities, ecological monitoring, and development of water resource protection measures in the Teteriv River basin system, as well as creating a system of ecologically balanced nature management within the Zhytomyr Polissia region. *Key words:* morphometric analysis, catchment basins, SRTM DEM, landscape differentiation, compactness coefficient, hypsometric integral, Teteriv River, Zhytomyr Polissia.

Вступ. Сучасні методи геопросторового аналізу та цифрового моделювання рельєфу відкривають нові можливості для комплексного дослідження морфометричних характеристик водозбірних басейнів як індикаторів ландшафтно-організації території. Розвиток геоінформаційних технологій та доступність високоякісних цифрових моделей рельєфу SRTM створили передумови для детального вивчення морфоструктурних особливостей річкових систем на різних просторових рівнях.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих підходів до оцінки морфоструктурних особливостей річ-

кових систем Житомирського Полісся в контексті ландшафтного планування та раціонального природокористування. Особливого значення набуває комплексне вивчення морфометричних характеристик водозбірних басейнів як основи для розуміння закономірностей функціонування геосистем та прогнозування їх розвитку в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Водночас, недостатнє вивчення кількісних морфометричних параметрів річкових систем регіону створює прогалини у розумінні механізмів ландшафтно-диференціації та обмежує можливості ефективного управління водними ресурсами.

У цьому контексті особливої уваги заслуговує басейнова система річки Тетерів з її притоками Кам'янка та Гнилоп'ять, що представляють різні типи ландшафтно-гідрологічних умов Житомирського Полісся. Застосування сучасних методів морфометричного аналізу для характеристики цих водозбірних басейнів дозволяє виявити закономірності просторової організації території та встановити кількісні критерії ландшафтно-диференціації.

Мета дослідження полягає у виявленні закономірностей ландшафтно-диференціації водозбірних басейнів приток річки Тетерів на основі ландшафтно-морфометричного аналізу з використанням SRTM DEM.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні завдання дослідження:

1. провести морфометричний аналіз водозбірних басейнів річок Тетерів, Кам'янка та Гнилоп'ять на основі SRTM DEM;
2. розрахувати коефіцієнт компактності, показники асиметрії басейнів та гіпсометричний інтеграл як індикатори ландшафтно-диференціації;
3. встановити морфометричні закономірності формування дренажних систем досліджуваних водозбірних басейнів;
4. визначити стадії геоморфологічного розвитку басейнів та їх ландшафтно-екологічні особливості.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному застосуванні ландшафтно-морфометричного підходу для характеристики водозбірних басейнів Житомирського Полісся з використанням сучасних геоінформаційних технологій та квантитативних методів аналізу цифрових моделей рельєфу. Вперше для досліджуваної території здійснено систематичний розрахунок морфометричних індикаторів ландшафтно-диференціації та встановлено їх взаємозв'язки з геоморфологічними особливостями регіону.

Практичне значення результатів дослідження визначається можливістю їх використання для ландшафтного планування, оптимізації водогосподарської діяльності, екологічного моніторингу та розробки заходів з охорони водних ресурсів у басейновій системі річки Тетерів. Отримані морфометричні характеристики можуть служити основою для розробки рекомендацій щодо раціонального використання території та створення системи екологічно збалансованого природокористування в межах Житомирського Полісся.

Аналіз попередніх досліджень. Дослідження морфометричних характеристик водозбірних басейнів з використанням SRTM даних представляє собою активно розвинений напрямок сучасної геоморфології та ландшафтознавства. Кількісний аналіз морфометричних параметрів басейнів з використанням цифрових моделей рельєфу SRTM та ГІС-технологій дозволяє ефективно визначати та інтерпретувати

просторові характеристики, що стосуються дренажних басейнів [1, с. 739]. Аналіз морфометричних параметрів відіграє вирішальну роль у розумінні та управлінні водозбірними басейнами, що робить його фундаментальним компонентом гідрологічних досліджень [7, с. 815]. Застосування SRTM DEM у морфометричному аналізі водозбірних басейнів стало широко визнаним підходом у світовій науковій практиці. Дослідження дренажної морфометрії та її впливу на гідрологію водозбірних басейнів з використанням даних Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) для підготовки цифрових моделей рельєфу (DEM), аспектичних сіток та карт схилів показує ефективність географічних інформаційних систем (ГІС) у оцінці лінійних, ареальних та рельєфних аспектів морфометричних параметрів [3, с. 543]. ГІС та дистанційне зондування є ефективним інструментом для визначення морфологічних характеристик басейну [2, с. 1]. Коефіцієнт компактності, як один із ключових морфометричних параметрів, широко використовується для характеристики форми водозбірних басейнів. Форма дренажного басейну зазвичай характеризується безрозмірним індексом, що виражається як відношення між двома вимірами розглянутого басейну, включаючи коефіцієнт компактності Гравеліуса (GC), який є одним із найбільш широко прийнятих індексів форми [5, с. 1]. Коефіцієнт компактності визначається як відношення периметра басейну до довжини кола, що має площу, рівну площі басейну [1, с. 745]. Асиметрія басейнів представляє важливий аспект морфометричного аналізу, що дозволяє оцінити ступінь відхилення від ідеальної симетричної форми водозбірного басейну. Ефективний морфометричний аналіз потребує кількісної оцінки лінійних, ареальних та рельєфних характеристик для характеристики річкових мереж та ідентифікації статистично значущих кореляцій між геоморфологічними властивостями та гідрологічною реакцією басейну [4, с. 1]. Гіпсометричний інтеграл як індикатор ландшафтно-диференціації набув особливого значення в сучасних дослідженнях. Гіпсометрична крива та гіпсометричний інтеграл є важливими індикаторами здоров'я водозбірного басейну, які можуть використовуватися під час оцінки стану ерозії водозбірного басейну [6, с. 158]. Гіпсометричний інтеграл може також визначати ерозійний цикл, а числа гіпсометричного інтегралу показують, що старий водозбір повністю стабілізований, знаходиться в рівновазі, або що він знаходиться під ризиком ерозії ґрунту [6, с. 160]. Гіпсометричний інтеграл (HI) є топографічним індексом із важливим геоморфологічним значенням для оцінки стадій геоморфологічного розвитку ландшафтів [7, с. 816]. Комплексне застосування морфометричних параметрів для характеристики ландшафтних комплексів демонструє високу ефективність у визначенні стадій геоморфологічного розвитку. Форма гіпсометричної кривої надає критичну геоморфологічну інформацію

щодо морфометрії водозбірних басейнів, а різниці в формі кривої та значенні гіпсометричного інтегралу для певного рельєфу вважаються пов'язаними зі ступенем дисбалансу в балансі ерозійних та тектонічних сил [7, с. 817]. Використання морфометричних параметрів дозволяє здійснювати пріоритизацію суб-водозборів, де території класифікуються за різними рівнями пріоритетності на основі комплексного аналізу геоморфологічних характеристик [6, с. 162]. Застосування SRTM даних у поєднанні з ГІС-технологіями створило нові можливості для автоматизації морфометричного аналізу. Точність та джерела цифрових моделей рельєфу (DEM) впливають на ефективність аналізу морфометричних параметрів, навіть коли використовуються DEM з однаковою роздільною здатністю [3, с. 551]. Сучасні дослідження підкреслюють важливість комплексного підходу до морфометричного аналізу, що інтегрує різні аспекти геоморфологічних характеристик для ландшафтно-типології та диференціації територій [4, с. 2]. Значний внесок у дослідження річкових систем Житомирщини зробили сучасні вітчизняні науковці Циганенко-Дзюбенко І.Ю. та Кірейцева Г.В., які протягом останніх років здійснюють комплексні гідроекологічні дослідження водних об'єктів регіону з використанням сучасних морфометричних підходів. Їхні наукові роботи охоплюють широкий спектр проблематики, пов'язаної з вивченням річок Тетерів та Кам'янка як ключових водних артерій Житомирської області. Зокрема, дослідники розробили математичні моделі для прогнозування просторово-часової динаміки гідроекологічних параметрів річкових екосистем з використанням інтегрально-модифікованої моделі Стрітера-Фелпса [8, с. 53]. Особливу увагу науковці приділяють вивченню процесів евтрофікації та гідрохімічного стану річок регіону, проводячи детальний аналіз розподілу важких металів у компонентах урбанізованих гідроекосистем та встановлюючи закономірності їх міграції [9, с. 135]. Важливим напрямком їхніх досліджень є оцінка антропогенного впливу на водні ресурси, включаючи вплив військових дій на гідромережу та розробку стратегій відновлення водних екосистем [10, с. 199]. Їхні роботи з біоіндикаційної оцінки екологічного стану річки Кам'янка в м. Житомирі за допомогою MIR-індексу та дослідження фіторе mediaційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроекосистем становлять значний науковий та практичний інтерес для розуміння морфометричних особливостей та сучасного стану річкових систем Житомирщини [11, с. 58; 12, с. 81].

Матеріали та методи дослідження.

Методологічна основа дослідження базувалася на комплексному ландшафтно-морфометричному підході до аналізу водозбірних басейнів приток річки Тетерів з використанням цифрових моделей рельєфу SRTM DEM (рис. 1). Вихідними матеріалами для

проведення морфометричного аналізу слугували цифрові моделі рельєфу формату SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільною здатністю 30 метрів, отримані з відкритих геопросторових ресурсів. Дані SRTM DEM характеризуються високою точністю висотних відміток та забезпечують достатню деталізацію для проведення морфометричних розрахунків на рівні малих та середніх водозбірних басейнів.

Алгоритм дослідження включав послідовне виконання п'яти основних етапів обробки та аналізу геопросторових даних (рис. 1). Початковий етап передбачав отримання та попередню обробку вихідних SRTM DEM даних, що включало перевірку цілісності растрових даних, корекцію артефактів та приведення до єдиної системи координат. На другому етапі здійснювалася обробка цифрових моделей рельєфу з метою підготовки до морфометричного аналізу, включаючи заповнення депресій, розрахунок напрямків стоку та акумуляції поверхневого стоку.

Третій етап методики полягав у визначенні та автоматизованому розмежуванні водозбірних басейнів досліджуваних приток річки Тетерів з використанням гідрологічних інструментів ГІС-пакетів. Ідентифікація та розмежування водозбірних басейнів здійснювалося на основі аналізу топографічного водорозділу з урахуванням морфоструктурних особливостей території. Четвертий етап включав обчислення ключових морфометричних параметрів, що характеризують геометричні, гіпсометричні та морфодинамічні властивості водозбірних басейнів, зокрема коефіцієнт компактності, показники асиметрії басейнів та гіпсометричний інтеграл.

Завершальний етап методики передбачав інтерпретацію отриманих результатів морфометричного аналізу в контексті ландшафтно-диференціації території дослідження. Інтерпретаційний аналіз базувався на встановленні кореляційних зв'язків між морфометричними індексами та ландшафтно-екологічними характеристиками водозбірних басейнів, що дозволило визначити індикаторну роль морфометричних параметрів у процесах ландшафтно-диференціації та типологічного районування території басейнової системи річки Тетерів.

Основна частина. Аналіз цифрових моделей рельєфу досліджуваних водозбірних басейнів приток річки Тетерів виявив значну морфометричну диференціацію території, що відображає складну взаємодію геоморфологічних, гідрологічних та ландшафтно-екологічних процесів у межах Житомирського Полісся. Морфоструктурні особливості території дослідження зумовлені приуроченістю до перехідної зони між Поліською низовиною та Придніпровською височиною, що створює специфічні умови для формування дренажних систем з різними морфометричними характеристиками.



Рис. 1. Схема проведення ландшафтно-морфометричного аналізу водозбірних басейнів приток р. Тетерів на основі SRTM DEM

Джерело: розроблено автором

Загальна характеристика рельєфу басейну річки Кам'янка (рис. 2) демонструє типові риси поліського ландшафту з відносно невеликими абсолютними висотами, що варіюють у межах від 179 до 256 метрів над рівнем моря. Територіальне розташування басейну річки Кам'янка в межах Житомирської області характеризується помірно розчленованим рельєфом з переважанням слабкохвилястих форм земної поверхні, що типово для перехідної зони між Поліською низовиною та Придніпровською височиною. Гіпсометричний аналіз виявляє поступове зниження абсолютних висот у напрямку від водорозділу до гирлової частини, що забезпечує формування оптимальних умов для концентрації поверхневого стоку та розвитку меандрової морфології русла.

Морфометрична структура басейну Кам'янки характеризується відносно компактною конфігурацією водозбірного контуру з незначними відхиленнями від еліпсоподібної форми. Аналіз розподілу висот показує переважання середньовисотних ділянок (200-230 м н.р.м.), що становлять близько 60% загальної площі басейну, тоді як низинні ділянки (179-200 м н.р.м.) займають приблизно 25% території. Найвищі ділянки рельєфу (230-256 м н.р.м.)

локалізовані в південно-західній частині басейну та складають близько 15% водозбірної площі, формуючи вододільні простори між басейнами Кам'янки та суміжних водотоків.

Детальний аналіз топографічної структури басейну річки Гнилоп'ять (рис. 3) свідчить про більш контрастний характер рельєфу порівняно з басейном Кам'янки, про що свідчить більший діапазон абсолютних висот від 186 до 319 метрів. Морфоструктурні особливості басейну Гнилоп'яті характеризуються чітко вираженою асиметрією з поступовим зниженням абсолютних висот у північно-східному напрямку, що відповідає загальному регіональному нахилу поверхні у бік Поліської низовини.

Гіпсометрична диференціація території басейну Гнилоп'яті демонструє закономірне зменшення висотних показників від водорозділу до гирлової частини, що створює сприятливі умови для формування дендритної дренажної мережі. Розподіл висотних зон характеризується переважанням середньовисотних ділянок (220-280 м н.р.м.), які займають близько 55% території басейну. Високі ділянки рельєфу (280-319 м н.р.м.) сконцентровані в півден-

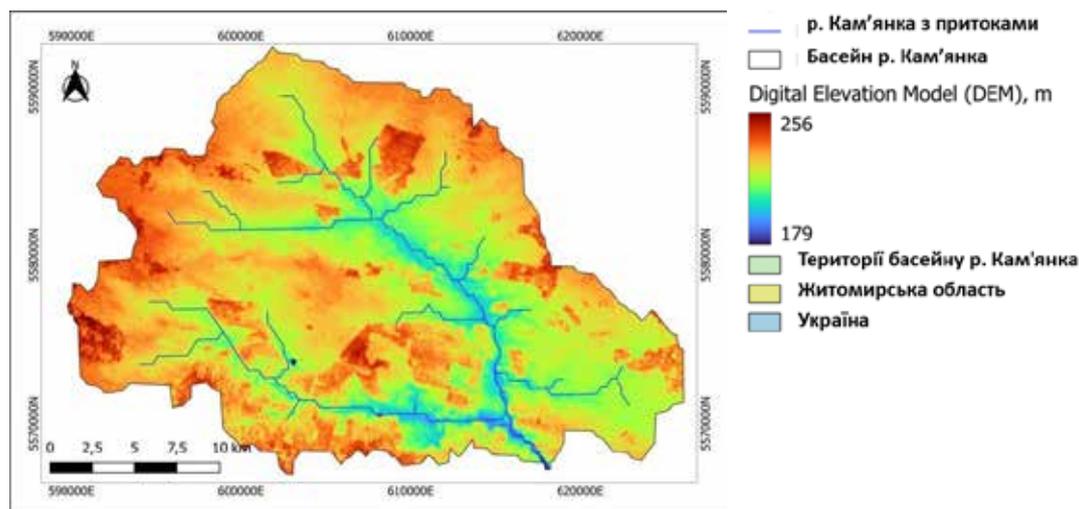


Рис. 2. Цифрова модель рельєфу басейну річки Кам'янка

Джерело: розроблено автором

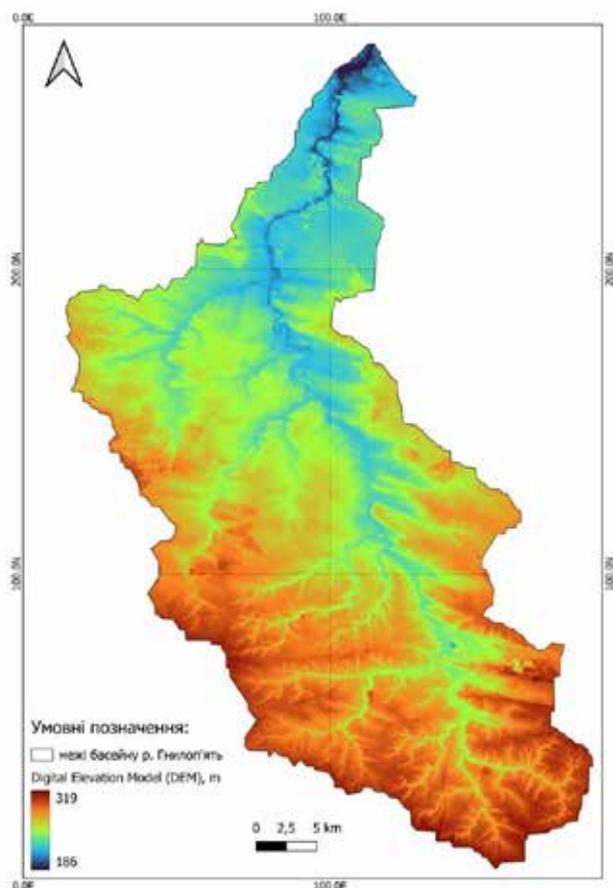


Рис. 3. Цифрова модель рельєфу басейну річки Гнилоп'ять

Джерело: розроблено автором

но-західній частині водозбору та становлять приблизно 20% загальної площі, формуючи основні вододільні лінії з суміжними басейнами. Низинні території (186-220 м н.р.м.) займають близько 25%

площі басейну та приурочені переважно до долинно-заплавних комплексів головного водотоку та його основних приток.

Комплексний аналіз басейну річки Тетерів (рис. 4) розкриває найбільш складну морфометричну структуру серед досліджуваних водозбірних басейнів, що обумовлено значною площею водозбору та різноманітністю геоморфологічних умов. Абсолютні висоти в межах басейну коливаються від 0 до 319 метрів, що відображає значну вертикальну розчленованість території та створює передумови для інтенсивного розвитку ерозійно-аккумулятивних процесів.

Просторовий розподіл висотних відміток в басейні Тетеріва характеризується чітко вираженою південно-західною – північно-східною диференціацією з максимальними висотами в межах Придніпровської височини та мінімальними значеннями в долинно-заплавних комплексах. Високогір'я та височинні ділянки (250-319 м н.р.м.) займають близько 30% території басейну та локалізовані переважно в південно-західній частині водозбору. Середньовисотні ділянки (150-250 м н.р.м.) становлять найбільшу частку території – приблизно 50% від загальної площі басейну. Низинні території (0-150 м н.р.м.) займають близько 20% площі водозбору та приурочені до долини головного водотоку, заплавних терас та пониззя основних приток.

Порівняльний морфометричний аналіз дренажних мереж досліджуваних басейнів виявляє суттєві відмінності в характері розгалуження водотоків та густоті гідрографічної мережі. Басейн річки Кам'янка характеризується відносно простою структурою дренажної мережі з переважанням водотоків першого-другого порядків, що відповідає слабкій ерозійній розчленованості території та свідчить про молодий вік гідрографічної системи. Густота дренажної мережі становить приблизно 0,6 км/км², що

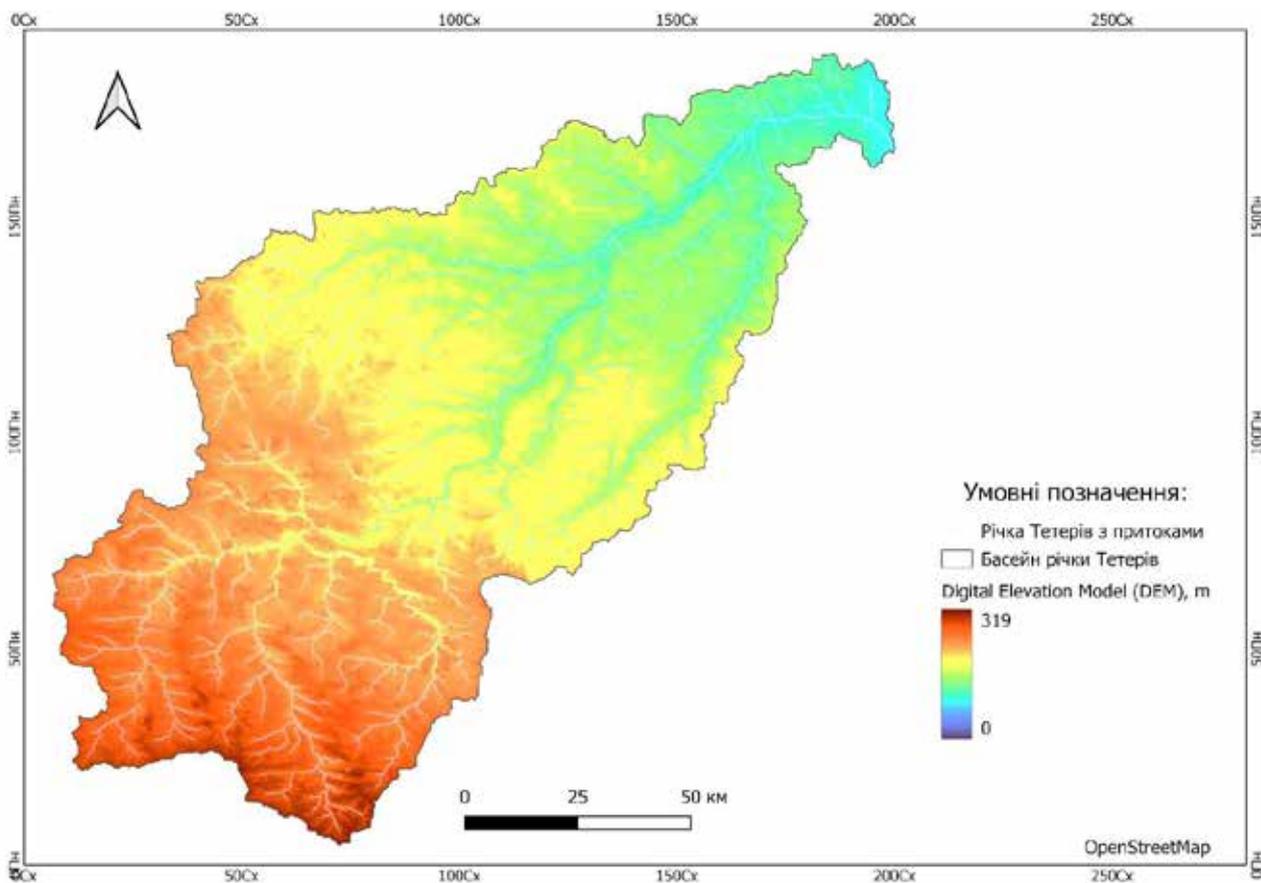


Рис. 4. Цифрова модель рельєфу басейну річки Тетерів з притоками

Джерело: розроблено автором

є типовим для територій з переважанням водопроникних ґрунтів та помірними кліматичними умовами.

Натомість, басейн Гнилоп'яті демонструє більш розвинену гідрографічну мережу з присутністю водотоків вищих порядків, що свідчить про інтенсивніші процеси флювіальної денудації та більшу зрілість дренажної системи. Густота гідрографічної мережі сягає $0,8 \text{ км/км}^2$, що пов'язано з більшою крутизною схилів та інтенсивнішими ерозійними процесами в межах басейну. Басейн Тетеріва характеризується найбільш складною ієрархічною структурою дренажної мережі з чітко вираженими водотоками п'ятого-шостого порядків та розгалуженою системою приток, при цьому густота дренажної мережі досягає $1,2 \text{ км/км}^2$.

Кількісний аналіз морфометричних індикаторів ландшафтної диференціації виявив суттєві відмінності між досліджуваними водозбірними басейнами (табл. 1). Коефіцієнт компактності басейну річки Кам'янка становить $1,84 \pm 0,03$, що свідчить про помірно витягнуту форму водозбору з відносно збалансованими лінійними параметрами та наближається до оптимальної гідрологічної конфігурації для ефективної концентрації стоку. Для басейну Гнилоп'яті характерний дещо вищий коефіцієнт

компактності $1,92 \pm 0,04$, що вказує на більшу витягнутість контуру басейну та потенційно більшу тривалість концентрації стоку, що може призводити до зменшення піків паводкових хвиль.

Басейн Тетеріва демонструє найвищий коефіцієнт компактності $2,15 \pm 0,05$, що відображає значну асиметрію та складність конфігурації водозбірного контуру, обумовлену геотектонічними особливостями території та довготривалими процесами флювіальної денудації. Висока компактність басейну Тетеріва корелює з розвиненою системою приток та складною морфологією долинно-річкової мережі.

Аналіз асиметрії басейнів показав найбільшу збалансованість для річки Кам'янка з коефіцієнтом асиметрії $0,48 \pm 0,02$, що наближається до ідеально симетричного басейну та свідчить про рівномірний розподіл притокової мережі відносно головного водотоку. Така симетрія забезпечує оптимальні умови для формування синхронних паводкових хвиль та ефективного водовідведення з території басейну. Басейн Гнилоп'яті характеризується помірною асиметрією з коефіцієнтом $0,62 \pm 0,03$, що свідчить про зміщення центру ваги басейну відносно головного водотоку та може призводити до формування асинхронних піків стоку від різних частин водозбору.

Таблиця 1

Морфометричні індикатори ландшафтної диференціації водозбірних басейнів приток річки Тетерів

Річка	Коефіцієнт компактності	Асиметрія басейну	Гіпсометричний інтеграл	Стадія розвитку
Кам'янка	1,84±0,03	0,48±0,02	0,42±0,01	Зріла
Гнилоп'ять	1,92±0,04	0,62±0,03	0,38±0,02	Зріла
Тетерів	2,15±0,05	0,71±0,04	0,35±0,02	Зрілий-старий

Найвища асиметрія властива басейну Тетеріва з коефіцієнтом $0,71 \pm 0,04$, що відображає значну нерівномірність розподілу притокової мережі та обумовлена особливостями геологічної будови та неотектонічних процесів у регіоні. Висока асиметрія басейну Тетеріва створює передумови для формування складних гідрологічних режимів з можливістю багатопікових паводків та нерівномірного водорозподілу в межах басейну.

Гіпсометричний інтеграл як індикатор стадії геоморфологічного розвитку показав різні значення для досліджуваних басейнів, що відображає різний ступінь морфологічної зрілості дренажних систем. Для річки Кам'янка гіпсометричний інтеграл становить $0,42 \pm 0,01$, що відповідає зрілій стадії геоморфологічного розвитку з рівноважним співвідношенням ерозійних та акумулятивних процесів. Таке значення свідчить про досягнення динамічної рівноваги між процесами врізання та розширення долини, що характерно для стабільних гідрологічних систем.

Басейн Гнилоп'яті характеризується гіпсометричним інтегралом $0,38 \pm 0,02$, що також відповідає зрілій стадії, але з тенденцією до старіння рельєфу та переважання денудаційних процесів над ерозійним врізанням. Басейн Тетеріва демонструє найнижче значення гіпсометричного інтегралу $0,35 \pm 0,02$, що свідчить про перехід до старої стадії геоморфологічного розвитку з переважанням денудаційних процесів над ерозійними та формуванням зрілих пенепленових поверхонь.

Отримані результати морфометричного аналізу дозволяють стверджувати про існування чіткої ландшафтної диференціації в межах досліджуваної території, що проявляється в різних типах морфометричних характеристик водозбірних басейнів. Виявлені закономірності відображають складну взаємодію регіональних геоморфологічних, кліматичних та гідрологічних факторів, що формують унікальні ландшафтно-екологічні умови кожного з досліджуваних басейнів та визначають специфіку їх гідрологічного режиму та екологічного потенціалу.

Висновки. Проведений ландшафтно-морфометричний аналіз водозбірних басейнів приток річки Тетерів з використанням SRTM DEM виявив значну морфометричну диференціацію території, що відображає різні стадії геоморфологічного розвитку та ландшафтно-екологічні умови. Розраховані морфометричні індикатори продемонстрували чіткі відмін-

ності між досліджуваними басейнами: коефіцієнт компактності варіює від $1,84 \pm 0,03$ для Кам'янки до $2,15 \pm 0,05$ для Тетеріва, асиметрія басейнів змінюється від $0,48 \pm 0,02$ до $0,71 \pm 0,04$, а гіпсометричний інтеграл коливається в межах $0,35 \pm 0,02$ – $0,42 \pm 0,01$, що свідчить про різні стадії геоморфологічного розвитку від зрілої до зрілої-старої. Виконання поставлених завдань дослідження дозволило встановити, що басейн річки Кам'янка характеризується найбільшою морфометричною збалансованістю та відповідає зрілій стадії розвитку, тоді як басейн Тетеріва демонструє найвищий ступінь складності конфігурації та перебуває на межі переходу до старої стадії геоморфологічного розвитку.

Встановлені морфометричні закономірності формування дренажних систем підтверджують існування чіткої ландшафтної диференціації в межах досліджуваної території, обумовленої взаємодією регіональних геоморфологічних, кліматичних та гідрологічних факторів. Аналіз просторового розподілу морфометричних характеристик виявив закономірне збільшення складності дренажних систем у напрямку від басейну Кам'янки до басейну Тетеріва, що корелює зі зростанням площі водозбору та різноманітністю геоморфологічних умов. Виявлені відмінності в густоті дренажної мережі (від $0,6$ км/км² для Кам'янки до $1,2$ км/км² для Тетеріва) та характері розгалуження водотоків свідчать про різну інтенсивність ерозійно-денудаційних процесів та ступінь зрілості гідрографічних систем.

Отримані результати створюють наукову основу для ландшафтного планування та раціонального використання водних ресурсів басейнової системи річки Тетерів, а також можуть бути використані для розробки стратегій екологічного моніторингу та охорони водних екосистем Житомирського Полісся. Практичне застосування розроблених морфометричних індикаторів дозволить оптимізувати територіальну організацію природокористування та підвищити ефективність управління водними ресурсами в умовах зростаючого антропогенного навантаження на ландшафтні комплекси регіону. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням переліку морфометричних параметрів, залученням додаткових методів геопросторового аналізу та детальним вивченням взаємозв'язків між морфометричними характеристиками та гідроекологічним станом водних об'єктів.

Література

1. Hasan M.M., Islam M.A., Miah M.G. Application of GIS and remote sensing in morphometric analysis of river basin at the south-western part of great Ganges delta, Bangladesh. *Hydrology Research*. 2023. Vol. 54. No. 6. P. 739-759. doi:10.2166/nh.2023.095
2. Jothimani M., Abebe A. Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Applied Water Science*. 2021. Vol. 11. No. 107. doi:10.1007/s13201-021-01447-9
3. Sreedevi P.D., Owais S., Khan H.H., Ahmed S. Morphometric analysis of a watershed of South India using SRTM data and GIS. *Journal of Geological Society of India*. 2009. Vol. 73. No. 4. P. 543-552. doi:10.1007/s12665-014-3914-1
4. Rodriguez-Prado A., García-López S., Velázquez-Velázquez E. Comprehensive geospatial assessment: morphometric parameters and hydrological implications in five Mexican basins. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. No. 1463. doi:10.1038/s41598-025-05194-8
5. Sassolas-Serrayet T., Cattin R., Ferry M. The shape of watersheds. *Nature Communications*. 2018. Vol. 9. No. 3791. doi:10.1038/s41467-018-06210-4
6. Shekar P.R., Mathew A. Prioritizing sub-watersheds for soil erosion using geospatial techniques based on morphometric and hypsometric analysis: a case study of the Indian Wyrā River basin. *Applied Water Science*. 2023. Vol. 13. No. 158. doi:10.1007/s13201-023-01963-w
7. Luo W. Hypsometric analysis with a geographic information system. *Computers & Geosciences*. 1999. Vol. 25. No. 1. P. 815-821. doi:10.1016/S0098-3004(98)00076-4
8. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Скиба Г.В. Прогнозування гідроекологічного стану річки Тетерів з використанням модифікованої моделі Стрітера-Фелпса. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2025. № 1(75). С. 53-64. DOI: 10.17721/2306-5680.2024.1.6
9. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Shomko O., Gandziura V., Khamdosh I. Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10. No. 2. P. 135-144.
10. Кірейцева Г.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Екологічна оцінка впливу військових дій на гідромережу Київської області та стратегії відновлення водних екосистем. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2025. № 1 (499). С. 199-207.
11. Кірейцева Г.В., Герасимчук О.Л., Скиба Г.В., Хоменко С.В., Циганенко-Дзюбенко І.Ю. Біоіндикаційна оцінка екологічного стану р. Кам'янка в м. Житомирі за допомогою MIR-індексу. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2024. Вип. 3 (146). С. 58-65.
12. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Демчук Л.І., Скиба Г.В., Вовк В.М. Оцінка стану та фіторе mediaційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроеко систем Малинщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 5 (50). С. 81-87.
13. Kapelista I., Kireitseva H., Tsyhanenko-Dziubenko I., Khomenko S., Vovk V. Review of Innovative Approaches for Sustainable Use of Ukraine's Natural Resources. *Grassroots Journal of Natural Resources*. 2024. Vol. 7, No. 3. P. 378-395.
14. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Sheliah K., Levytska T., Kalenska V. Mathematical forecasting of spatio-temporal dynamics of hydroecological parameters of river ecosystems using integrally-modified Streeter-Phelps model. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, № 3. P. 309-316.
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Sheliah K., Levytska T., Kalenska V. Mathematical forecasting of spatio-temporal dynamics of hydroecological parameters of river ecosystems using integrally-modified Streeter-Phelps model. *Journal Environmental Problems*. 2025. Vol. 10, № 3. P. 309-316. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.03.309> SCOPUS
16. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Хамдош І.Н., Вовк В.М. Бібліометричний аналіз світових досліджень донних відкладів: тенденції публікацій та напрями розвитку седиментології. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2025. № 2(76). С. 6-20. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2025.2.1>
17. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Fonseca Araújo J. Physiological and biochemical biomarkers of macrophyte resilience to military-related toxic stressors. *Journal Environmental Problems*. 2024. Vol. 9, No. 4. P. 227-234.

Дата першого надходження рукопису до видання: 06.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ТРАНСФОРМАЦІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ТА ВОДОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАСЕЛЕННЯ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННО-ТЕХНОГЕННИХ ЗАГРОЗ: ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЧНІ ОРІЄНТИРИ ДЛЯ ЗАБЕЗАПЕЧЕННЯ СТАЛОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Новікова А.М.¹, Мохонько В.І.²

¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова
вул. Черноглазівська, 17, 61002, м. Харків

²Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля
вул. Іоанна Павла II, 17, 01042, м. Київ
novikovaan3010@gmail.com, mohonko@snu.edu.ua

Метою дослідження є здійснення комплексного аналізу сучасного стану та трансформації водних ресурсів і системи водокористування в Україні в умовах триваючих воєнних дій та посилення техногенного навантаження. Дослідження спрямоване на виявлення основних тенденцій, ризиків і управлінських викликів, що визначають рівень водної безпеки держави в умовах війни та екологічної нестабільності. У роботі застосовано системний підхід, статистичний та порівняльний аналіз, просторову оцінку динаміки водоспоживання, а також аналіз регіональних відмінностей у забезпеченості водними ресурсами. Оцінювання базується на інтеграції даних щодо водного балансу, інтенсивності водокористування та впливу воєнно-техногенних факторів на гідрологічні системи. Встановлено суттєві структурні та динамічні зміни у водоспоживанні на загальнодержавному і регіональному рівнях. Значна частина території України нині зазнає дефіциту водних ресурсів, спричиненого поєднанням природно-кліматичних і техногенних чинників, що посилилися внаслідок збройної агресії Російської Федерації. Найбільш виражений дефіцит води спостерігається в південних і східних регіонах, зокрема в Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій, Донецькій і Луганській областях. Серед основних загроз водній безпеці виокремлено пошкодження інфраструктури, забруднення водних об'єктів унаслідок воєнних і промислових впливів, а також дисбаланс водокористування у кризових умовах. Для забезпечення сталого функціонування водогосподарського комплексу України та гарантування доступу населення до якісних водних ресурсів необхідним є впровадження адаптаційних стратегій управління. Це передбачає розроблення адаптивної моделі управління водними ресурсами, заснованої на сценарному підході, міжвідомчій координації, кризовому плануванні та діджиталізації управлінських процесів. Отримані результати можуть слугувати науковою основою для формування політики водної безпеки України та розроблення ефективних рішень у сфері екологічного та ресурсного менеджменту. *Ключові слова:* водні ресурси, питне водопостачання, водозабір, воєнно-техногенні загрози, стале водокористування, екологічне управління, адаптаційні стратегії.

Transformation of water resources and water supply in Ukraine under war and technogenic threats: challenges and strategic guidelines for ensuring sustainable water provision. Novikova A., Mokhonko V.

The purpose of this study is to conduct a comprehensive analysis of the current state and transformation of water resources and the water use system in Ukraine under the conditions of ongoing military actions and increasing technogenic pressure. The research aims to identify the main trends, risks, and management challenges that determine the country's water security in the context of war and ecological instability. The study applies a systems approach, statistical and comparative analysis, spatial assessment of water consumption dynamics, and evaluation of regional disparities in water availability. The analysis integrates data on water balance, water use intensity, and the influence of war-related and technogenic factors on hydrological systems. The findings reveal significant structural and dynamic changes in water consumption at both national and regional levels. A large part of Ukraine's territory is currently experiencing water scarcity caused by the combined effects of natural-climatic and technogenic factors, intensified by the armed aggression of the Russian Federation. The most severe water deficits are observed in the southern and eastern regions – particularly in Odesa, Mykolaiv, Kherson, Zaporizhzhia, Donetsk, and Luhansk oblasts. The study identifies the major risks to water security, including damaged infrastructure, pollution from military and industrial activities, and the imbalance of water use during crisis conditions. To ensure sustainable operation of the national water management system and guarantee access to quality water resources, it is necessary to implement adaptive management strategies. These include developing an adaptive water resource management model based on a scenario approach, interagency coordination, crisis planning, and digitalization of management processes. The results provide a scientific foundation for formulating Ukraine's water security policy and developing effective solutions in the field of environmental and resource management. *Key words:* water resources, drinking water supply, water intake, war-technogenic threats, sustainable water use, environmental management, adaptive strategies.

Постановка проблеми. Забезпечення населення України якісною питною водою є однією з найважливіших складових сталого розвитку суспільства, оскільки вода виступає базовим природним ресур-

сом, необхідним для підтримання життєдіяльності людини, функціонування економіки та збереження екосистем. Водні ресурси виступають критично важливою складовою екологічної, соціальної та еко-

номічної стабільності будь-якої країни, однак їхній стан у сучасних умовах характеризується комплексом трансформацій, пов'язаних з глобальними кліматичними змінами, урбанізацією, зростанням антропогенного навантаження та ризиків надзвичайних ситуацій природного й техногенного характеру. Для України питання сталого водопостачання є надзвичайно актуальним через нерівномірний територіальний розподіл водних ресурсів, високу залежність від транскордонних вод, значний рівень забруднення поверхневих і підземних джерел водопостачання. Додатковими чинниками, що загострюють ситуацію, є воєнні дії, які вже призвели до погіршення якості та обмеження доступу населення до безпечної питної води через порушення функціонування систем водозабезпечення, руйнування об'єктів критичної інфраструктури, аварій на гідротехнічних спорудах та промислових об'єктах.

Актуальність дослідження. В умовах зростання водного дефіциту виникає потреба у розробленні нових моделей управління водними ресурсами, орієнтованих на адаптацію до кризових ситуацій і відновлення екологічної рівноваги. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю наукового осмислення процесів трансформації водних ресурсів під впливом воєнно-техногенних загроз, оцінки впливу воєнних і техногенних факторів на водний баланс території України, а також формування стратегічних орієнтирів для забезпечення сталого функціонування водогосподарського комплексу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У контексті сучасних екологічних викликів і міжнародних зобов'язань України щодо реалізації Цілей сталого розвитку ООН (зокрема ЦСР 6 «Чиста вода та належні санітарні умови») забезпечення населення питною водою належної якості та обсягів постає не лише як соціально-економічна, а й як стратегічна екологічна проблема, вирішення якої потребує науково обґрунтованої системи управління водними ресурсами. Результати дослідження спрямовані на поглиблення уявлень про закономірності трансформації водних ресурсів під впливом техногенних і воєнних факторів, а також обґрунтування засад для модернізації систем управління водокористуванням та ефективної політики сталого водопостачання в умовах військової агресії та післявоєнного відновлення України.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останніми роками українські вчені активно досліджують питання забезпечення населення України якісною питною водою та питання безпечного водокористування. Зокрема, дослідженню сучасного стану водних ресурсів країн Європи, у тому числі України та їх регіонального розподілу, формуванню ефективної водної політики і сталого використання водних ресурсів присвячені праці В.К. Хільчевського [1, 2, 3], В.К. Хільчевського та В.В. Гребня [4],

М.А. Хвесика та ін. [5]. Результати аналізу забезпеченості областей України прогнозними ресурсами та експлуатаційними запасами підземних вод питної якості, співвідношення обсягів поверхневих і підземних вод у водопостачанні приведені у праці В.М. Шестопалова і Н.Г. Люти [6]. У контексті дослідження питання водних конфліктів, пов'язаних зі збройними діями як у світі, так і в Україні, можна відзначити публікації В.К. Хільчевського, зокрема, по класифікаційних ознаках водних конфліктів [7, 8] та водних конфліктах на Донбасі [9]. Питання водної безпеки, особливо в умовах впливу воєнних дій на довкілля, розглядаються у дослідницькому звіті екологічної громадської організації «Екодія» [10], у якому наголошується на екоцидному характері збройної агресії Росії. На міжнародному рівні увага водній безпеці в умовах воєнних конфліктів приділяється в аналітичних публікаціях Світового банку, Організації економічного співробітництва та розвитку (OECD), та інших джерелах, де підкреслюється важливість впровадження системи адаптивного водного стратегічного планування на рівні річкових басейнів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність певного наукового доробку, динаміка змін у стані й розподілі водних ресурсів на території України в умовах збройної агресії Російської Федерації залишаються недостатньо вивченою. У зв'язку з цим дослідження трансформації водних ресурсів на загальнодержавному та регіональному рівнях в умовах зростання екологічних та безпекових загроз, пов'язаних з воєнними діями, є вкрай актуальними для розробки стратегії сталого водозабезпечення та ефективних механізмів управління водними ресурсами.

Новизна. Проведено комплексний аналіз сучасного стану та структури водних ресурсів, особливостей змін у сфері водокористування, які відбулися в Україні з початку повномасштабного вторгнення РФ, визначено ключові чинники водної безпеки для обґрунтування адаптаційних стратегій і управлінських рішень щодо забезпечення сталого функціонування водогосподарського комплексу країни.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження трансформаційних процесів у сфері водних ресурсів України під впливом воєнно-техногенних загроз має важливе наукове й практичне значення для обґрунтування стратегічних орієнтирів забезпечення сталого водопостачання, спрямованих на підвищення стійкості водогосподарських систем, адаптацію до формування ефективної системи управління водними ресурсами у воєнний та післявоєнний період.

Було зібрано та проаналізовано інформаційно-аналітичні дані щорічних звітів про стан та використання водних ресурсів в Україні, дані, отримані з інших українських і міжнародних відкритих дже-

рел. При обробці отриманих результатів застосовувались методи картографічної інтерпретації.

Виклад основного матеріалу. За результатами оцінки водних ресурсів України, виконаної В.К. Хільчевським на підставі аналізу бази даних глобальної інформаційної системи FAO Aquastat 2017 [1], загальні відновні водні ресурси країни становлять 175,3 км³ на рік, з яких 97% формується за рахунок поверхневого річкового стоку. Транзитний річковий стік складає 120,2 км³ або 68,6% від загальних відновних ресурсів, внутрішній річковий стік – 50,1 км³ або 28,6% від загальних ресурсів, а доступні запаси підземних вод – 5,0 км³, тобто близько 3%. За даними the World Bank Group, 2020 серед 20 європейських країн Україна за показником забезпеченості водними ресурсами посідає 17 місце та 124 місце в списку 181 країн світу за даними 2014 р. [10]. Слід зазначити, що майже всі цифри по водних ресурсах України, які наводяться в FAO Aquastat, так чи інше відрізняються від тих, що публікуються в українських джерелах. Але ці показники близькі до даних ООН, згідно з якими рівень водозабезпечення населення України становить близько 1,2 тис. м³ на одну людину, що недостатньо для розвитку країни [6].

Місцевий річковий стік складає всього біля третини ресурсів, але є ключовим джерелом водопостачання населення, що проживає на територіях з високою щільністю річкових мереж. Лише Закарпатська область належить до категорії середньої забезпеченості місцевим стоком – 6,3 тис. м³ на одну людину. Низька забезпеченість місцевим стоком Чернігівській, Житомирській, Волинській та Івано-Франківській областях – 3,3–2,0 тис. м³. В інших областях України спостерігається низька і дуже низька забезпеченість – 1,98–0,12 тис. м³ на одну людину [10]. Отже, за результатами проведених оцінювань, Україна має дефіцит та високий коефіцієнт зовнішньої залежності водних ресурсів, так як більше ніж дві третини водозабезпечення населення залежить від обсягів припливу транзитних вод.

Неоднорідність геолого-структурної та гідрологічної будови території України обумовлює специфічну сукупність природно-кліматичних та накладених на них техногенних чинників, що визначають закономірності формування, просторового поширення, гідрохімічного складу природних вод у окремих регіонах. А це, у свою чергу, зумовлює значну різноманітність типів джерел водопостачання, варіабельність їх потенціалу, якості та доступності.

Незважаючи на те, що загальний дефіцит поверхневого стоку в останній тридцятирічній період збільшився і становить близько 20–25 км³, поверхневі води залишаються головним джерелом питного водопостачання в Україні. В країні встановлено 9 районів річкових басейнів. З них основними, які забезпечують поверхневий стік, є басейни Дніпра, Дністра, Південного Бугу і Сіверського Дінця.

Внаслідок вторгнення Росії в Україну, станом на 1 серпня 2022 року території річкових басейнів Криму (з 2014 року) та Приазов'я тимчасово контролюється російськими військами. Також тимчасово контролюються частини інших річкових басейнів. Зокрема, на непідконтрольній Україні території знаходяться 69% басейну річки Дон, 22% басейну річок Причорномор'я та 6% басейну Дніпра [11]. Поряд із ресурсами річок велику господарську роль відіграють запаси води в природних і штучних водосховищах загальним обсягом 55 км³ [10].

Загальні прогнозні ресурси підземних вод України складають 61689,2 тис. м³/добу, з яких 57458,1 тис. м³/добу мають мінералізацію до 1,5 г/дм³. Забезпеченість прогнозними ресурсами питних підземних вод населення України по регіонах коливається в межах 0,3–5,5 тис. м³/добу, а в середньому становить 1,3 тис. м³/добу на одну особу. Переважаюча частина прогнозних ресурсів зосереджена у північних та західних областях України, зокрема у Чернігівській області вона складає 8326,7 тис. м³/добу. Найменша – в Кіровоградській (404,6 тис. м³/добу), Чернівецькій (405,3 тис. м³/добу) і Миколаївській (441,6 тис. м³/добу) областях.

Загальні експлуатаційні запаси підземних питних і технічних вод України складають 16241,155 тис. м³/добу, з них балансових запасів – 16162,370 тис. м³/добу, в т. ч. за категоріями А+В+С1 – 15183,226 тис. м³/добу, за категорією С2 – 979,144 тис. м³/добу; позабалансових запасів – 78,785 тис. м³/добу [12]. Нерівномірною є розвіданість запасів підземних вод. Лише в басейні Сіверського Донця на становить близько 50%, а в інших – менше ніж 30%, зокрема у басейні Дніпра – лише 20% [10].

Глибоке залягання підземних вод деяких басейнів, зокрема, Дніпровсько-Донецького та Волино-Подільського артезіанських басейнів, зумовлює високий рівень їх природної захищеності, що забезпечує тривалу сталість складу підземних вод і можливість їх використання для питного водопостачання навіть за несприятливих екологічних умов на поверхні. Незважаючи на це, за даними Національної доповіді про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2023 році [12] з початку військової агресії РФ, у загальному водоспоживанні держави доля підземних вод, що використовуються на питні та санітарно-гігієнічні потреби знизилась і становила біля 6% у 2022 р. і 5,5% у 2023 р. від загального забору підземних вод. Низький середній показник частки підземних вод у системах господарсько-питного водопостачання обумовлений зниженням обсягів їх видобутку у регіонах з найбільшою щільністю населення.

З метою дослідження змін у водозабезпеченні населення України, які відбулися внаслідок активізації збройного конфлікту на території України, було проаналізовано дані щодо обсягу забору води з при-

родних джерел, узагальнені у річних Національних доповідях про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні за період 2021–2023 рр. [12, 13, 14]. За даними державного обліку водокористування за формою 2ТП-водгосп (річна) загальний обсяг вилученої з природних водних джерел води у порівнянні з 2021 р. знизився на 41,7% у 2022 р. і на 32,2% у 2023 р. (табл. 1). Протягом досліджуваного періоду спостерігається чітка тенденція переважання обсягів забору поверхневих вод над підземними. Так, у 2021 році частка поверхневих вод у загальному обсязі водозабору становила 91,2%, у 2022 р. – 87,6%, а у 2023 р. – 89,2%.

За період 2021–2023 рр. відбулися істотні трансформації і у регіональній структурі водопостачання, про що свідчить аналіз просторово-часової динаміки обсягів водозабору у окремих областях України (рис. 1).

До початку повномасштабної агресії РФ лідируючі позиції за обсягами водозабору утримував Донецька область, де загальний забір води у 2021 р. складав 1539,231 млн м³. Однак у 2022 році цей показник знизився на 82,6% – до 267,53 млн м³.

У 2023 році зафіксовано часткове відновлення водозабору – до 350,352 млн м³, проте загальний рівень забору води залишався на 77,2% нижчим, ніж у 2021 році.

З початку воєнної агресії спостерігається динаміка зменшення загального водозабору у ряді областей, зокрема, у Дніпропетровській, Запорізькій, Сумській Чернігівській областях. Водночас у деяких регіонах спостерігаються протилежні тенденції. Зокрема, в Одеській області обсяг водозабору у 2021 році складав 1001,94 млн м³, у 2022 році він знизився на 33,3% – до 667,633 млн м³, проте вже у 2023 році цей показник перевищив довоєнний рівень і становив 1293,27 млн м³ (зростання на 48,4% порівняно з 2022 роком). У Київській області також зафіксовано стабільне зростання обсягів водозабору з 523,531 млн м³ у 2021 році до 575,161 млн м³ у 2022 році (+ 9,8%) і до 720,669 млн м³ у 2023 році (+37,4% до рівня 2021 року). У Луганській області відзначено практично повну втрату функціонуючих водозаборів внаслідок окупації, що призвело до суттєвого зниження водозабезпечення населення. У Херсонській області, де рівень водозабору

Таблиця 1

Обсяг забору води з природних джерел за період 2021–2023 рр.

Рік	Загальний обсяг (млн м ³)	Поверхневі води (млн м ³)	Підземні води (млн м ³)
2021	8348,5	7613,4	735,1
2022	4860,964	4259,473	601,487
2023	5657,596	5048,025	609,571

Вказані дані є наближеними через відсутність повної інформації щодо територій, які перебувають на території, тимчасово невідконтрольній Україні.

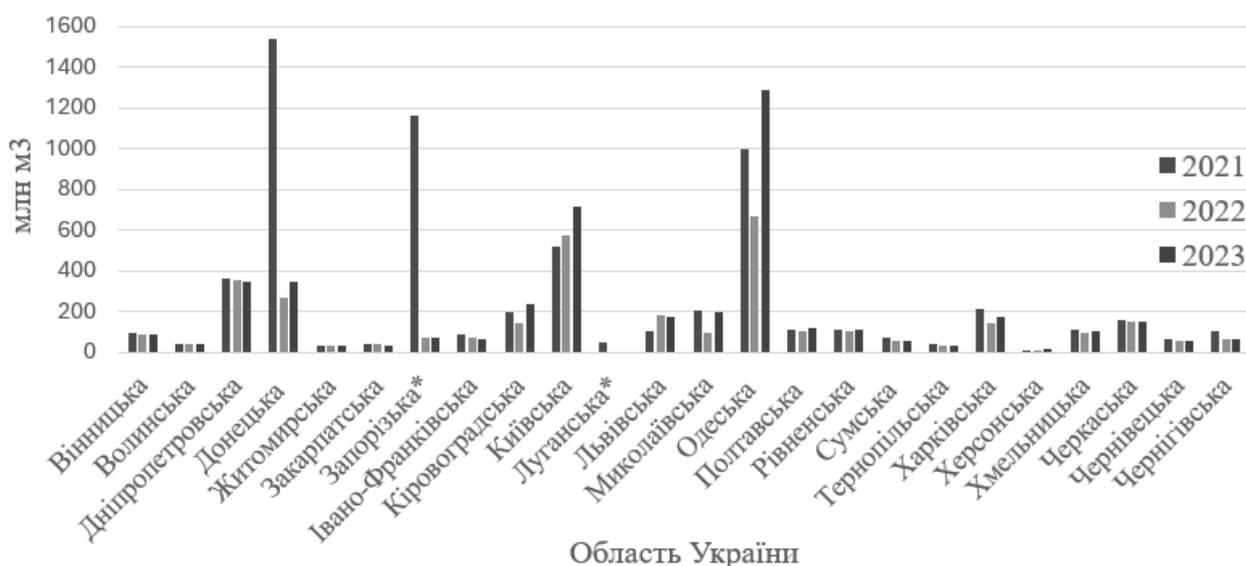


Рис. 1. Динаміка забору води з природних джерел у 2021–2023 роках

*У зв'язку з відсутністю даних за 2021 рік, наданих окремими областями, для забезпечення повноти аналізу використано усереднене значення показників за період 2019–2020 рр.

до 2022 року залишався порівняно низьким, після звільнення частини територій спостерігається тенденція до поступового відновлення водопостачання.

Серед усіх адміністративно-територіальних одиниць України близько 20% областей протягом досліджуваного періоду демонстрували сталу тенденцію перевищення обсягів забору підземних вод (табл. 2).

Незважаючи на домінування підземних джерел водопостачання у розглянутих областях, ступінь залежності від них та якісні характеристики вод мають регіональні відмінності. Найсприятливіші умови для використання підземних вод для питного водопостачання сформовані у Полтавській та Тернопільській областях, де в артезіанських басейнах зосереджені стабільні запаси прісних вод із низькою мінералізацією та оптимальним хімічним складом, що дає можливість використовувати їх без складної підготовки. Волинська область також вирізняється значними ресурсами якісних підземних вод, що пояснює їхнє широке застосування. У Львівській області підземні води є ключовим джерелом питного постачання через високе антропогенне навантаження на поверхневі води та їх значне забруднення. Сумська область характеризується відносно сприятливими умовами формування підземних вод, проте невеликий стік річок та значне антропогенне забруднення поверхневих джерел обумовлюють домінуючу роль артезіанських вод у забезпеченні населення питною водою.

За результатами даних забору води було проведено ранжування областей по обсягам забору води станом на 2023 р. з поверхневих (рис. 2) і підземних джерел (рис. 3). До групи з найменшим обсягом забору води з поверхневих джерел (менше 50 млн м³) потрапили Закарпатська, Львівська, Тернопільська, Волинська, Житомирська Чернігівська, Полтавська, Сумська, Херсонська області, а до групи з обсягом забору води з поверхневих джерел більше ніж 1000 млн м³ тільки одна область – Одеська. Ранжування областей

по обсягам забору води з підземних водних джерел свідчить про те, що більшість областей України відноситься до групи з забором води від 10 до 30 млн м³.

Характерним залишається домінуюче використання поверхневих джерел водопостачання для великих промислових центрів, таких як Дніпро, Запоріжжя, Кривий Ріг та інші. Це створює додаткові виклики для водної безпеки, так як якість поверхневих вод залишається незадовільною та демонструє сталу тенденцію до деградації протягом останніх десятиліть [9].

Головні висновки. На сучасному етапі значна частина території України перебуває у стані водного дефіциту, що зумовлюється як природно-кліматичними чинниками, так і техногенними навантаженнями, посиленними внаслідок збройної агресії Російської Федерації. Воєнні дії істотно загострили проблему водозабезпечення окремих регіонів, внаслідок втрати контролю над окремими джерелами водозбору, пошкодження та знищення критичної водогосподарської інфраструктури, порушення роботи систем централізованого водопостачання.

Найбільш виражений дефіцит водних ресурсів спостерігається в південних та східних регіонах держави – зокрема в Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій, Донецькій та Луганській областях. Ці території традиційно характеризуються низьким рівнем природного зволоження, обмеженим розвитком гідрографічної мережі та значною залежністю від міжбасейнового перерозподілу вод. Поєднання природно-кліматичних факторів з антропогенними впливами, особливо збройною агресією, призвело до загострення проблеми водного дефіциту в цих регіонах. Особливо критичною є ситуація у Донецькій та Луганській областях, де зруйновано значну частину насосних станцій, водогонів і водоочисних споруд. Особливої уваги потребує Кримський півострів, який після анексії Росією втратив доступ до Північно-Кримського каналу, що забезпечував до

Таблиця 2

Порівняння обсягів заборів підземних і поверхневих вод у деяких областях України за 2021–2023 роки за даними [12, 13, 14]

Регіон	Рік	2021			2022			2023		
		Поверхневі води, млн. м ³	Підземні води, млн. м ³	Перевищення, %	Поверхневі води, млн. м ³	Підземні води, млн. м ³	Перевищення (%)	Поверхневі води, млн. м ³	Підземні Води, млн. м ³	Перевищення (%)
Волинська		8,20	36,63	63,4	8,81	33,27	58,1	7,90	35,83	63,9
Львівська		8,25	110,25	86,1	3,79	100,3	92,7	26,77	148,02	69,4
Полтавська		43,95	69,83	22,7	36,06	64,83	28,5	35,28	84,52	41,1
Сумська		30,05	41,00	15,4	24,37	35,14	18,1	24,40	35,21	18,1
Тернопільська		17,42	21,75	11,1	17,42	20,10	6,3	17,09	19,45	6,5

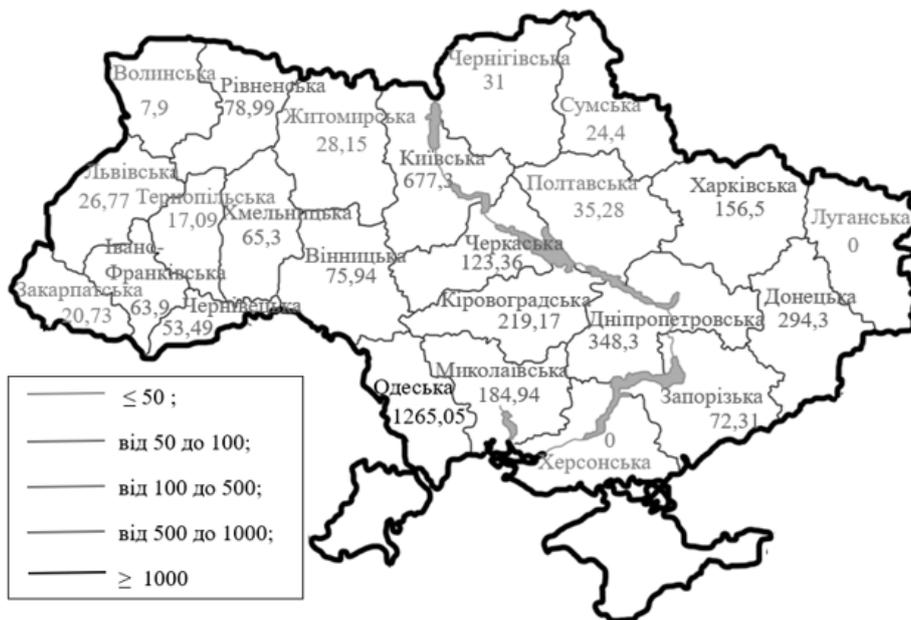


Рис. 2. Обсяги забору води (млн м³) з поверхневих водних джерел у 2023 році по регіонах України

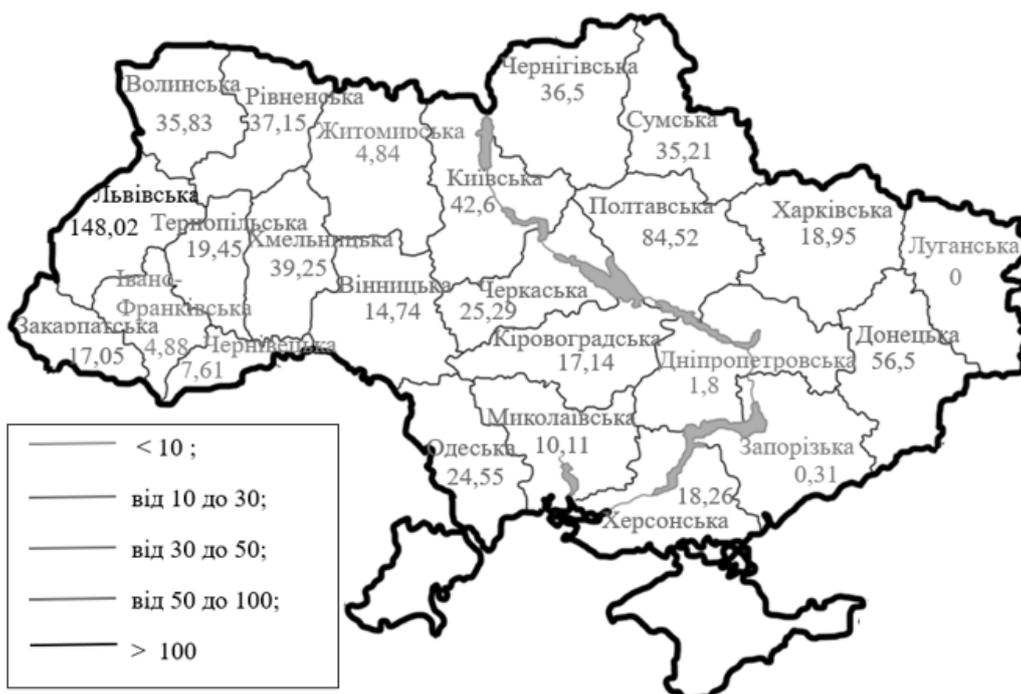


Рис. 3. Обсяги забору води (млн м³) з підземних водних джерел у 2023 році по регіонах України

85% потреб регіону у прісній воді, що спричинило різке загострення водного дефіциту та деградацію природних екосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. У сучасних умовах для вирішення проблем сталого водопостачання необхідно втілення комплексу заходів, зокрема, створення резервних джерел водопостачання та кризових

центрів реагування на аварії на водних об'єктах, залучення міжнародної підтримки (технічної, фінансової, експертної) для відновлення об'єктів водного господарства та впровадження практик сталого водокористування, розробки та впровадження комплексних стратегій управління водними ресурсами, включаючи модернізацію інфраструктури, впровадження сучасних систем моні-

торингу та адаптацію до змін клімату, створення адаптивної моделі управління водними ресурсами, яка передбачає сценарний підхід, міжвідомчу координацію, кризове планування, діджиталізацію управлінських процесів у галузі водокористу-

вання, Комплексне врахування вказаних аспектів дозволить сформувати ефективну модель управління водною безпекою України в умовах високих ризиків та невизначеності, що забезпечить захист населення та стале функціонування держави.

Література

1. 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. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2021_1_3
2. Хільчевський В.К. Водні ресурси країн Європи: характеристика на основі бази даних FAO-Aquastat. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2023. № 1 (67). С. 6-17. URL: https://www.researchgate.net/publication/373998006_WATER_RESOURCES_OF_EUROPEAN_COUNTRIES_CHARACTERISTICS_BASED_ON_THE_FAO-AQUASTAT_DATABASE
3. Хільчевський В.К., Гребінь В.В. Гідрографічне та водогосподарське районування території України, затверджене у 2016 р. – реалізація положень ВРД ЄС. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. № 1(44). С. 8-20. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/glghge_2017_1_3
4. Хільчевський В.К. Водна політика: світові тенденції, стан в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2023. № 4(70), С. 6-22. URL: https://hydro-chemistry-ecology.knu.ua/wp-content/uploads/2023/12/1_2023_470.pdf
5. Хвесик М., Левковська Л., Мандзик В. Стратегія водної політики України: перспективи реалізації. *Економіка природокористування і сталий розвиток*. 2021. № 10 (29). С. 6-15. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/017386b7-244f-465a-99a3-c2dc2b9991a4/content>
6. Шестопапов В. М., Люта Н. Г. Щодо оптимального співвідношення поверхневих і підземних вод у водопостачанні населення в Україні. *Мінеральні ресурси України*. 2024. № 1. 41-49. URL: <https://doi.org/10.31996/mru.2024.1.41-49>
7. Хільчевський В.К. Водні та збройні конфлікти – класифікаційні ознаки: у світі та в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. № 1(63). С. 6-19. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.1.1>
8. Хільчевський В.К. Глобальні водні ресурси: виклики XXI століття. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2020. Вип. 1/2 (76/77). С. 6-16. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKNU_geograf_2020_1-2_3
9. Хільчевський В.К. Водні конфлікти у світі і в Україні: Донбас. *Підземні води як стратегічний ресурс економічного розвитку держави, присвяченої Всесвітньому дню водних ресурсів* : матеріали міжнарод. наук.-практ. онлайн-конф. Київ, ІВПіМ НААНУ, 2022. С. 14-15. URL: <http://mivg.iwpim.com.ua/files/tezy2022.pdf>
10. Сніжко С., Шевченко О., Дідовець Ю. Аналіз впливу кліматичних змін на водні ресурси України (повний звіт за результатами проекту). Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2021, 68 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>
11. Хільчевський В.К., Гребінь В.В. Деякі аспекти щодо стану території районів річкових басейнів та моніторингу вод під час вторгнення Росії в Україну. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. № 3(65). С. 6-14. URL: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.1> <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/06/analiz-vplyvu-vodni-resursy-full.pdf>
12. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2023 році / Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2024, 438 с. URL: <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html?PrintVersion> (дата звернення: 13.10.2025)
13. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 році / Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2023, 397 с. URL: <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html?PrintVersion> (дата звернення: 13.10.2025)
14. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2021 році / Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2022, 326 с. URL: <https://mtu.gov.ua/content/nacionalna-dopovid-pro-yakist-pitnoi-vodi-ta-stan-pitnogo-vodopostachannya-v-ukraini.html?PrintVersion> (дата звернення: 13.10.2025)

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 628.161.1

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.10>

СТАНДАРТИ ЯКОСТІ ВОДИ В СИСТЕМАХ ГОСПОДАРСЬКО-ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В УКРАЇНІ

Приходько В.Ю., Ільїна А.О.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, 65015, м. Одеса

ilina_ann@ukr.net

В статті розглянуті питання стандартів у сфері господарсько-питного водопостачання, а саме вимоги до якості води водних об'єктів, що використовуються як джерело господарсько-питного водопостачання, вимоги до якості питної води за умов централізованого і нецентралізованого водопостачання. Метою даної статті є аналіз стандартів якості води в системах господарсько-питного водопостачання міста. Об'єкт дослідження – система водопостачання міста. Предмет дослідження – нормативи якості води в окремих елементах системи водопостачання.

Питання, пов'язані із забезпеченням якості питної води, відносяться до пріоритетних завдань національної політики. Аналіз ефективності функціонування системи господарсько-питного водопостачання міста пропонується визначати на таких складових: забір, водопідготовка та постачання. В статті наведено перелік пунктів відповідності якості води в сфері господарсько-питного водопостачання. Сучасні стандарти містять велику кількість показників і, загалом, відповідають найкращим міжнародним практикам у сфері стандартизації питної води. Наразі в Україні функціонує два стандарти якості питної води: Державні санітарно-епідеміологічні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (2010 р.) та Державний стандарт України 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» (2014 р.). В цілому, стандарти узгоджені між собою, проте є певні відмінності у кількості та агрегації показників якості води. Дослідження нормативів вмісту речовин показало, що за окремими показниками складу води із джерел господарсько-питного водопостачання та питної води має місце суттєва різниця у значеннях встановлених нормативів. До таких речовин відносяться такі важкі метали, як миш'як, молібден., нікель, свинець, сурма, а також органічні речовини – бензол та хлорфеноли. Показано, що зразки питної води подекуди характеризуються підвищеним вмістом миш'яку, а також кадмію і свинцю. Стандартні технології водопідготовки з усуненням кольоровості, завислих речовин та знезараженням не спроможні довести якість питної води до нормативної навіть у випадку відповідної якості води у водозаборі. Це свідчить про необхідність впровадження додаткових технологій з усунення важких металів та хлорвмісних сполук на етапі водопідготовки. *Ключові слова:* питна вода, стандарти, джерело водопостачання, водопідготовка, показники якості.

Water quality standards in municipal drinking water supply systems in Ukraine. Prykhodko V., Ilina A.

The issues of standards in the field of drinking water supply are considered in the article, namely, water quality requirements for water objects used as a source of drinking water supply, requirements for drinking water quality in conditions of centralised and non-centralised water supply. The purpose of this article is to analyse the water quality standards in the city's drinking water supply systems. The object of research is the city water supply system. The subject of the study is water quality standards at individual elements of the water supply system.

Issues related to ensuring the high quality of drinking water are among the priorities of national policy. It is proposed to analyse the efficiency of the city's drinking water supply system based on the following components: water intake, drinking water treatment and supply. The article provides a list of points of compliance with water quality in the field of drinking water supply. Modern standards contain a large number of indicators and, in general, meet the best international practices in the field of drinking water standardization. Currently, there are two drinking water quality standards in Ukraine: State Sanitary and Epidemiological Norms and Rules 'Hygienic Requirements for Drinking Water Intended for Human Consumption' (2010) and State Standards of Ukraine 7525:2014 'Drinking Water. Requirements and methods of quality control' (2014). In general, the standards are consistent with each other, but there are some differences in the number and aggregation of water quality indicators. Research into substance content standards has shown that there is a significant difference in the values of standards for certain indicators of water composition water from drinking water sources and drinking water. These substances include heavy metals such as arsenic, molybdenum, nickel, lead, antimony, as well as organic substances such as benzene and chlorophenols. It has been shown that drinking water samples are sometimes characterised by elevated levels of arsenic, cadmium and lead. Standard water treatment technologies for removing colour, suspended solids and disinfection are not capable of bringing the quality of drinking water up to standard, even if the water quality at the water intake is adequate. This indicates the need to introduce additional technologies for the removal of heavy metals and chlorine-containing compounds at the water treatment stage. *Key words:* drinking water, standards, water supply source, water treatment, quality indicators.

Постановка проблеми та її актуальність. Забезпечення населення якісною питною водою є однією з важливих задач сучасного суспільства. Так, в 2015 р. країнами-членами ООН була прийнята глобальна програма (резолюція) із забезпечення сталого розвитку «Перетворення нашого світу: Порядок денний в області сталого розвитку на період до

2030 року» (Порядок денний 2030) [12]. Серед цілей сталого розвитку (ЦСР) є шоста ціль – Чиста вода та належні санітарні умови, з переліком завдань, пов'язаних із забезпеченням населення якісною та безпечною питною водою. В Україні наразі розроблено та законодавчо затверджено різні програми та нормативні акти, спрямовані на поліпшення ситуації у сфері

забезпечення якості питної води та роботи систем водопостачання, наприклад, «Загальнодержавна цільова соціальна програма «Питна вода України» на 2022–2026 роки», метою якої є «забезпечення якісною питною водою в необхідних обсягах та відповідно до встановлених нормативів щодо якості питної води». Якість води регламентується Законом України «Про питну воду та питне водопостачання» (2002) [5]. Громади затверджують місцеві програми реформування та розвитку жилого-комунального господарства (наприклад, Міська цільова програма розвитку житлового господарства м. Одеси на 2022–2026 роки), серед завдань яких є забезпечення населення якісною питною водою.

Якість питної води є предметом щорічних Національних доповідей про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні [8], а також окремих баз даних: в даній статті частково використовуються результати моніторингу якості питної води Всеукраїнського Водного Товариства WaterNet (<https://waternet.ua/water-map>).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання оцінки якості питної води не втрачають актуальності на теренах сучасної наукової думки. Серед основних питань – розробка та запровадження стандартів якості води з метою забезпечення безпеки для здоров'я людини. Достатньо згадати еволюцію стандартів якості в незалежній Україні – від Державного стандарту 2874-82 «Вода питна. Гігієнічні вимоги та контроль за якістю» (назва у перекладі) до запровадження у 1996 р. Державних санітарно-епідеміологічних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (наразі діє версія від 2010 р. [3]). Отже, аналіз стандартів якості питної води є актуальною науковою задачею. Так, в статті О.В. Шестопалова та інш. [10] розглянуті питання норм якості питної води крізь призму міжнародного досвіду. Автори наголошують на актуальності перегляду стандартів у сфері питної води відповідно до найкращих світових практик та з урахуванням ефектів від військових дій на системи та джерела водопостачання. В статті Т.А. Сафранова [9] мінералізація як комплексний показник якості води з джерел питного водопостачання. Доведено, що в процесі водопідготовки мінералізація дещо знижується одночасно зі зменшенням вмісту есенціальних елементів. В статті Т.О. Василенко [1] досліджено вміст важких металів у питній воді по регіонах України з акцентом на використанні цієї води в агропромисловому комплексі. Показано, що для води сільськогосподарських і переробних підприємств характерний понаднормативний вміст кадмію та свинцю.

Наразі у сфері забезпечення якості питної води існує два стандарти: Державні санітарно-епідеміологічні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10, 2010 р.) [3] та ДСТУ

7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» (2014 р.) [4]. Вода з поверхневих водних об'єктів оцінюється за гігієнічними нормативами якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення (Наказ МОЗ № 721 від 2.05.2022 [2]). Але ці нормативи якості води з джерел водопостачання не стосуються підземних вод, якість яких регламентується ДСТУ 7525:2014. Очевидно, необхідний аналіз та систематизація існуючих нормативів з урахуванням процесу водопідготовки та забруднення джерел водопостачання, особливо в умовах кліматичних змін.

Метою даної статті є аналіз стандартів якості води в системах господарсько-питного водопостачання міста. Об'єкт дослідження – система водопостачання міста. Предмет дослідження – нормативи якості води в окремих елементах системи водопостачання. **Методи дослідження:** узагальнення та класифікація, порівняльний аналіз.

Виклад основного матеріалу. Система господарсько-питного водопостачання міста охоплює весь цикл виробництва питної води – від забору води з джерел питного водопостачання до доведення її якості до вимог на питну воду і подальше споживання населенням. Тому доцільно виділити такі елементи системи господарсько-питного водопостачання міста: забір води з джерела, водопідготовка, водопостачання та водоспоживання (рис. 1).

Відповідно до Закону України «Про питну воду та питне водопостачання» [5], існує поняття «пункт відповідності якості питної води», що було взято за основу визначення «пункт відповідності якості води в системі водопостачання міста» – місце відбору проб води, в якому встановлюється відповідність якості води відповідним вимогам.

Виходячи з комплексного розгляду системи водопостачання, сформуємо повний та послідовний перелік пунктів (табл. 1).

Отже, повна система стандартів якості води в системі господарсько-питного водопостачання міста охоплює:

- 1) вимоги до якості води водних об'єктів, що використовуються як джерело господарсько-питного водопостачання (поверхневі та підземні);
- 2) вимоги до якості питної води централізованого водопостачання;
- 3) вимоги до якості питної води нецентралізованого водопостачання;
- 4) вимоги до якості води джерел мінеральних вод;
- 5) специфічні вимоги для промисловості.

Такий розподіл в цілому відповідає переліку нормативів, затвердженому ст. 29 Закону України «Про питну воду та питне водопостачання» [5]. Проаналізуємо системи нормативів якості води в системі господарсько-питного водопостачання міста.

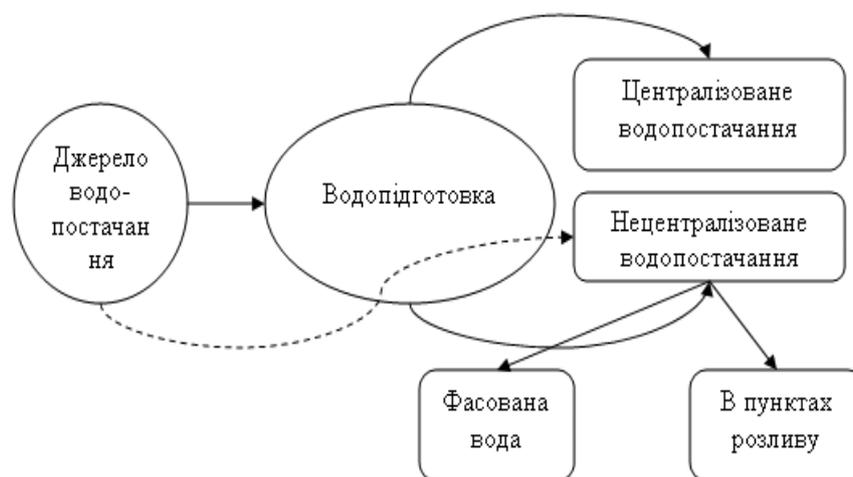


Рис. 1. Система господарсько-питного водопостачання міста

Таблиця 1

Перелік пунктів відповідності якості води в системі господарсько-питного водопостачання міста

Пункт відповідності	Опис
в місцях забору води з джерел господарсько-питного водопостачання	для оцінки якості води водного об'єкта як джерела господарсько-питного водопостачання міста
з кранів систем питного водопостачання	для оцінки якості питної води з водопроводу (централізоване водопостачання)
в місцях розливу у тару споживача	для оцінки якості питної води в пунктах розливу системи нецентралізованого водопостачання
в місцях розливу у споживчу тару	Для оцінки якості фасованої питної води
у місцях використання на підприємстві	для питної води, що використовується для виробничих (технологічних) потреб

Джерело: розроблено на основі [5]

1. Нормативи якості води водних об'єктів. До водних об'єктів, які використовуються як джерела питного водопостачання, розроблені гігієнічні нормативи якості, що містяться в Наказі МОЗ України «Про затвердження гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» № 721 від 2.05.2022 [2]. Даний документ розроблений на основі ДержСанПіНу 4630-88 «Санітарні правила і норми охорони поверхневих вод від забруднення», що діяв з 1988 по 2016 рр. Вимоги до якості води водних об'єктів включають:

1) загальні вимоги до складу і властивостей води водних об'єктів (нормується 14 основних показників складу і властивостей води);

2) перелік гранично допустимих концентрацій (ГДК) речовин у воді водних об'єктів (ГДК встановлені для 1378 речовин).

2. Нормативи якості питної води. Що стосується питної води, на сьогодні її якість регламентується двома взаємопов'язаними стандартами: Державні санітарно-епідеміологічні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10,

2010 р.) [3] та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» (2014 р.) [4].

В табл. 2 представлений порівняльний аналіз показників, за якими проводиться оцінка якості питної води в стандартах [3] та [4].

Як бачимо, стандарти у сфері забезпечення якості питної води здебільшого доповнюють один одного, проте є показники складу і властивостей води, представлені в одному з вказаних стандартів.

3. Стандарти якості води та технології водопідготовки. Порівняння вимог до якості питної води, що надходить до населення (ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (2010 р.) [3] та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» (2014 р.) [4]), і води, яка надходить із природних джерел і використовується для водопостачання (гігієнічні нормативи [2], 2022 р.), дає змогу окреслити кілька висновків. По-перше, кількість показників, що визначають якість питної води (69-82), на порядок менша за кількість показників, зміст яких регламентується для води водних об'єктів (1378). По-друге, проаналізувавши значення концентрацій 40 речовин у питній воді [9] та у воді

Порівняльний аналіз вимог стандартів якості питної води

Група показників	ДСанПін 2.2.4-171-10	ДСТУ 7525:2014
Показники епідемічної безпеки питної води:	мікробіологічні (9) паразитарні (2)	мікробіологічні (8) вірусологічний (1) паразитарні (2) мікологічний (1)
	Σ 11 показників	Σ 12 показників
Санітарно-хімічні показники якості та безпечності води	органолептичні (4); фізико-хімічні (17); санітарно-хімічні (20+10 з 2022 р.+ 12 додаткових)	органолептичні (4); хімічні (17); санітарно-токсикологічні (30)
	Σ 63 показники	Σ 51 показник
Показники питомої сумарної α- і β-активності	Σ 2	Σ 2
Радіаційні показники	Σ 6	оцінюється за показниками сумарної α- і β-активності
Показники фізіологічної повноцінності мінерального складу питної води	Σ 9	оптимальні діапазони вказані в для окремих хімічних показників
Речовини, що утворюються або надходять у питну воду під час водопідготовки	частково у групі фізико-хімічних показників	Σ 13
Рівень токсичності води		Σ 4 лише для води нецентралізованого питного водопостачання
Разом	91	82

водних об'єктів, що використовуються як джерело господарсько-питного водопостачання [3], визначили окремі показники, для яких характерна певна різниця в концентраціях (табл. 3). В аспекті використання стандартних технологій водопідготовки, які здебільшого приводять у відповідність із нормами органолептичні та пов'язані із ними властивості питної води, вищезазначений перелік вказує на необхідність застосування додаткових методів очищення води, зокрема, для вилучення важких металів.

Також зазначимо, що для речовин, які цтворюються в процесі знезараження води, значення ГДК у питній воді вищі, аніж для води водних об'єктів: 3 та 0,02 мг/дм³ для 1,2-дихлоретану та 2 і 0,006 мг/дм³ для тетрахлоруглецю відповідно.

По-перше, з табл. 3 впливає необхідність проведення комплексних досліджень за вмістом важких металів та органічних сполук антропогенного походження. По-друге, є окремі випадки перевищення вмісту важких металів у питній воді (особливо це характерно для населених пунктів Херсонської та запорізької областей). Очевидно, це пов'язано із незадовільним станом поверхневих водних об'єктів. Так, у Національній доповіді (2023) [8] вказується на перевищення вмісту нікелю, кадмію в районах питних водозаборів на річках басейнів Дніпра та Дунаю. В дослідженні О.В. Зоріної, С.В. Протас [6] наведено висновок щодо понаднормативного забруднення питних водозаборів басейну р. Дніпро органічними речовинами, а також нікелем і селеном. Автори наго-

лошують про необхідність оцінки якості питних вод за індикаторними показниками.

В Керівництві з контролю якості питної води [12] вказується про можливу канцерогенність (2В) миш'яку, сурми, свинцю, а також тетрахлоруглецю та 1,2-дихлоретану, а бензол означений як канцерогенна речовина. Хлорфеноли у питній воді справляють імуно- та нейротоксичну дію. Тому важливо не лише впроваджувати сучасні стандарти, що нормують вміст цих речовин у питній воді, а й забезпечувати контроль вмісту речовин. Технології вилучення з питної води важких металів – зворотній осмос, ультра- та нанофільтрація – мають обмеження по собівартості очищення, обсягам води та додатковим наслідкам. Наприклад, воду після зворотного осмосу необхідно доводити до якості питної води оптимізацією мінерального складу. Не менш важливо попереджати утворення хлорорганічних сполук шляхом усунення органічних речовин перед знезараженням шляхом окислення, введення оптимальних доз і форм хлору до питної води тощо.

Головні висновки. Стандартизація у сфері питної води є передумовою та критерієм забезпечення населення якісною питною водою. Сучасні стандарти якості питної води в Україні активно розвиваються відповідно до найкращих світових практик в сфері стандартизації якості питної води. Система стандартів у сфері питного водопостачання є комплексною, охоплює усі елементи системи водопостачання та вимоги споживачів.

Порівняльна характеристика вмісту окремих речовин в питній воді та воді водних об'єктів

№	Показник	Концентрація, мг/м ³		Питна вода міських агромереж [7]	Підприємства АПК України [1]	Дані Water Net*
		у питній воді (водопровід)	у воді водних об'єктів			
1	Кадмій	<0,001	0,001	0,0001-0,0005	0,008±0,002	0,01
2	Миш'як	0,01	0,05	0,0001-0,005	-	0,12
3	Молібден	0,07	0,25	0,0025-0,01	-	-
4	Нікель	0,02	0,1	-	-	-
5	Свинець	0,01	0,03	0,005	0,037±0,05	0,01
6	Сурма	0,005	0,05	-	-	-
7	Бензол	0,001	0,5	-	-	-
8	Хлорфеноли	0,0003	0,001	-	-	-

Примітка: курсивом позначені речовини, для яких допустимі концентрації в питній воді вищі, аніж у воді водних об'єктів (продукти хлорування питної води)

* розраховане середнє значення для населених пунктів, де відмічено перевищення ГДК у питній воді.

Вивчення та аналіз вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (2010 р.) та ДСТУ 7525:2014 «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості» (2014 р.) показав, що вони стандарти якості питної води тісно пов'язані, проте мають окремі методологічні відмінності.

Порівняльний аналіз вимог до природної води, яка використовується для водопостачання (гігієнічні вимоги, 2022 р.), та вже підготовленої питної води (ДСанПіН 2.2.4-171-10 (2010 р.) та ДСТУ 7525:2014 (2014 р.)), свідчить про необхідність удосконалення

систем водопідготовки для вилучення важких металів та попередження утворення хлорвмісних органічних сполук.

Аналіз ситуації із забрудненням окремими важкими металами питних вод в регіонах України вказує на необхідність вичерпних досліджень, оскільки в питній воді населених пунктів південних регіонів України спостерігається понаднормативний вміст миш'яку, а свинцю та кадмію – на рівні ГДК. Основним фактором формування незадовільної якості питної води є насамперед забруднення питних водозаборів, що сьогодні значно посилюється під впливом кліматичних змін.

Література

1. Василенко Т.О. та ін. Санітарно-токсикологічна оцінка питної води підприємств АПК за вмістом важких металів. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2017. 5/2 (32). С. 20–26.
2. Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення (Затверджені Наказом МОЗ України № 741 від 2.05.2022). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text>
3. Державні санітарно-епідеміологічні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
4. ДСТУ 7525:2014. «Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості». URL: http://iccwc.org.ua/docs/dstu_7525_2014.pdf
5. Закон України «Про питну воду та питне водопостачання». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text>
6. Зоріна О.В., Прогас С.В. Гігієнічна оцінка якості водопровідних питних вод за санітарно-хімічними показниками та удосконалення науково-методологічних підходів до їх оцінки з урахуванням вимог європейського законодавства. *ScienceRise: Biological Science*. 2018. № 4(13). С. 4–11. DOI:10.15587/2519-8025.2018.140861
7. Лупашко О.О. Важкі метали як показники якості питних вод окремих регіонів України: магістерська робота. Одеса, 2018. 79 с. http://eprints.library.odku.edu.ua/id/eprint/5011/1/LupashkoOO_KEOD_KMR_Z2018.pdf
8. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2023 році. URL: <https://mindev.gov.ua/diialnist/napriamy/sfera-komunalnykh-posluh/tsentralizovane-vodopostachannia-ta-vodovidvedennia/natsionalna-dopovid-pro-iakest-pytnoi-vody-ta-stan-pytneho-vodopostachannia-v-ukraini>
9. Сафранов Т. А. Мінералізація питних вод як показник їх якості та фактор впливу на здоров'я населення. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2018. (1-2 (29)). С. 73–80.
10. Шестоपालов О.В. та ін. Аналіз показників якості води: сучасні аспекти і виклики. *Екологічні науки*. 2024. № 3(54). С. 86–82 DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.3-54.10>
11. Guidelines for drinking-water quality, 4th ed. WHO. 2011. 564 p. URL: <https://iris.who.int/handle/10665/44584>
12. UN. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015. URL: <https://sdgs.un.org/2030agenda>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 504.064.2

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.11>

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД Р. ДНІПРО В МЕЖАХ ЧЕРКАСЬКОГО РЕГІОНУ

Шахман І.О., Чвартковська А.О.

Херсонський державний університет
вул. Університетська, 27, 73000, м. Херсон
shakhman.i.a@gmail.com

Здатність поверхневих вод до саморегуляції та самовідновлення є ключовим чинником, що впливає на екологічний стан річок. Через інтенсивне антропогенне навантаження, яке підсилене глобальним потеплінням та довготривалою російською військовою агресією, питання забезпечення країни прісною водою належної якості набуває виняткової актуальності. Водночас зниження доступності до якісних водних ресурсів створює серйозні ризики для екологічної безпеки та сталого розвитку країни.

У статті наведені результати дослідження екологічного стану річки Дніпро в межах Черкаського регіону за комплексними показниками екологічного стану (КПЕС) за 2021–2024 роки та екологічної надійності (здатності ділянки річки до саморегуляції та самовідновлення) в часі.

Проаналізовані сучасні джерела антропогенного впливу на поверхневі водні ресурси басейну р. Дніпро на території Черкаського регіону.

Виконано оцінювання екологічного стану поверхневих вод річки Дніпро на території Черкаської області за методикою визначення комплексних показників екологічного стану відповідно діючим нормативам для водних об'єктів рибогосподарського призначення, як найбільш чутливих до забруднення водного середовища (період спостережень 2021–2024 рр.). Результати дослідження демонструють лише від'ємні значення комплексних показників екологічного стану з незначною динамікою в напрямку покращення (збільшення середніх і мінімальних значень), але зі стабільним “нестійким” екологічним станом ділянки р. Дніпро в межах території дослідження. Результати розрахунку показника екологічної надійності ділянки річки за чотири роки спостереження свідчать про низький рівень саморегуляції та самовідновлення і вказують на необхідність розроблення та впровадження природоохоронних заходів, направлених на охорону і раціональне використання водного об'єкта. *Ключові слова:* річка Дніпро, Черкаський регіон, якість води, екологічний стан, комплексний показник екологічного стану, екологічна надійність.

Study of the ecological state of surface waters of the Dnipro River within the Cherkasky region. Shakhman I., Chvartkovska A.

Self-purification potential and capability of restoration of the surface waters is a key factor influencing the ecological state of rivers. Due to intensive anthropogenic load, exacerbated by global warming and prolonged Russian military aggression, the issue of ensuring the country's supply of freshwater of adequate quality has become exceptionally urgent. At the same time, the decreasing availability of high-quality water resources poses significant risks to ecological security and the sustainable development of the country.

The article presents the results of a study of the ecological state of the Dnipro River within the Cherkasky Region, based on complex index of the ecological state (CIES) for the period 2021–2024, as well as the ecological reliability (the river self-purification potential and capability of restoration) in time.

Modern sources of anthropogenic impact on surface water resources of the Dnipro River basin in the Cherkasky region are analyzed.

An assessment of the ecological state of surface waters of the Dnipro River in the Cherkasky region was evaluated using the calculation method of complex indices of the ecological state in accordance with current standards for water bodies intended for fisheries (observation period 2021–2024). The study results show only negative values of the comprehensive ecological state indicators, with a slight trend toward improvement (an increase in mean and minimum values), yet the ecological condition of the Dnipro River section within the study area remains consistently “unsteady.” The calculation of the ecological reliability indicator for the river section over the four-year observation period indicates a low level of self-purification potential and capability of restoration. *Key words:* the Dnipro River, the Cherkasky Region, water quality, ecological state, complex index of ecological state, environmental reliability.

Постановка проблеми. Відповідальні спеціалісти за виконання розділів Екологічного паспорту Черкаської області серед найважливіших проблем регіону з року в рік визначають проблему забруднення поверхневих вод “скидами забруднюючих речовин із зворотними водами промислових підприємств, підприємствами житлово-комунального господарства” [1, 2]. Дані Регіонального офісу водних ресурсів у Черкаській області за чотири роки спостережень (2021–2024) демонструють значні обсяги скидання у поверхневі водні ресурси забруднених стічних вод об'єктами господарю-

вання (близько 3,5 млн. м³), шахтних і кар'єрних вод (понад 1,5 млн. м³). Фахівці звертають увагу на необхідність реконструкції каналізаційних очисних споруд в містах Богачеве, Канів, Сміла, Тальне, Чигирин, смт Чорнобай. Екологи щорічно фіксують “порушення гідрологічного і гідрохімічного режиму малих річок регіону” [1–3]. Проблемою місцевого значення так і залишається проблема “забруднення водних об'єктів недостатньо очищеними стічними водами від комунальних господарств та промислових підприємств”, що призводить до постійного перевищення нормативних показників за санітар-

но-хімічними та мікробіологічними показниками в джерелах питного водопостачання [1–4].

Актуальність дослідження. Питання раціонального використання та охорони вод завжди була актуальною для України – держави, що є найменш водозабезпеченою серед країн Європи, і в якій використання водних ресурсів “здійснюється переважно нераціонально” [5]. Необхідність збереження та відновлення природних екосистем є важливим завданням нашої країни. Особливо гостро постає ця проблема під час війни, коли наявні додаткові ризики: надходження забруднюючих речовин з території країни-агресора – Російської Федерації; дефіцит фінансових, матеріальних і трудових ресурсів; перманентна небезпека при проведенні моніторингу вод та контролю стану водних об’єктів. Тому, дуже важливо, особливо в умовах сьогодення, щоб річки не втратили природну здатність до саморегуляції і самовідновлення.

Зв’язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Закон України “Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики на період до 2030 року” наголошує на необхідності “забезпечення конституційного права кожного громадянина України на чисте та безпечне довкілля, впровадження збалансованого природокористування і збереження та відновлення природних екосистем” [5]. Серед першопричин екологічних проблем України документ визначає забруднення та нераціональне використання водних ресурсів, що призводить до “погіршення екологічного стану річкових басейнів” [5], та унеможливає досягнення однієї зі стратегічних цілей державної екологічної політики – “Ціль 4: Зниження екологічних ризиків з метою мінімізації їх впливу на екосистеми, соціально-економічний розвиток та здоров’я населення” [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Результати досліджень державного моніторингу вод 2021–2024 років свідчать, що сучасний екологічний стан поверхневих водних ресурсів Черкаського регіону зазнає антропогенного навантаження через виробничу діяльність суб’єктів господарювання області, яке підсилюється незадовільною ситуацією в житлово-комунальному секторі. Зношеність технологічного обладнання локальних та централізованих очисних споруд або їх відсутність призводить до надходження великих обсягів недостатньо очищених стічних вод до поверхневих водних об’єктів області і до забруднення водних ресурсів “практично в кожному районі та місті” [1–3].

Масштаби водоспоживання в Черкаському регіоні зросли за основними галузями економіки: в промисловості на 1,1 млн м³, у сільському господарстві на 4,2 млн м³, у житлово-комунальному господарстві на 0,1 млн м³. Обсяги зворотних (стічних) вод також збільшилися на 1,68 млн м³. Треба зазначити, що об’єми скиду забруднених зворотних вод зменшилися на 0,083 млн м³ [2, 3].

Основними джерелами забруднення поверхневих вод басейну р. Дніпро в межах території дослідження у 2024 році залишаються підприємства ВП “Хлистунівський кар’єр” АТ “Укрзалізниця”, КП “Чигирин”, КП “ВОДГЕО” м. Сміла [1–3].

Фахівці Державної екологічної інспекції під час проведення лабораторного контролю якості поверхневих вод у 2024 році в Кременчуцькому водосховищі зафіксували 19 випадків перевищень гранично допустимих концентрацій по біологічному споживанню кисню, хімічному споживанню кисню (с. Сокирне від 2,6 до 3,9 разів), залізу загальному (с. Сокирне в 1,1 рази), азоту амонійному та завислим речовинам. На більшості водотоків середньої частини басейну р. Дніпро у 2024 р. порівняно із 2023 роком спостерігалось збільшення середньорічних концентрацій сполук нітрогену амонійного (коливання становили від 0,21 до 1,6 мгN/дм³), нітрогену нітратного (від 0,13 до 3,44 мгN/дм³), фосфору загального (від 0,065 до 1,735 мгP/дм³) [1–3].

За повідомленням Українського гідрометеорологічного центру у вересні 2025 року водність р. Дніпро була значно нижче за місячну норму. Бічний приплив води в Кременчуцькому водосховищі становив всього 16 % [6]. Зафіксована складна гідрологічна ситуація позначилася на показниках якості води у водному об’єкті. Вже у жовтні показники фітопланктону (індикатор стану гідроекосистеми) відповідали 3–4 класу якості (ДСТУ 4808:2007) – змінювалися від “задовільної, прийнятної якості води” до “посередньої, обмежено придатної, небажаної якості води” [7].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Виконано оцінювання якості води р. Дніпро в межах Черкаської області (для ділянки річки р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) питний в/з м. Черкаси (678 км від гирла)) за показниками екологічного стану та здатності водного об’єкта до саморегуляції, самоочищення і самовідновлення в часі (за 2021–2024 роки).

Новизна. Виконана оцінка якості води р. Дніпро в межах Черкаського регіону за комплексними показниками екологічного стану та визначено екологічну надійність за 2021–2024 роки відповідно до показників діючих нормативів поверхневих водних об’єктів рибогосподарського призначення.

Методологічне або загальнонаукове значення. Визначено необхідність використання розрахункових методик оцінки екологічного стану річкових басейнів, які враховують ефект сумарної дії забруднюючих речовин, відповідно до рибогосподарських нормативів, як найбільш чутливих до змінення екологічного стану водного об’єкта.

Викладення основного матеріалу. Попередні етапи наукового дослідження щодо оцінювання якості річкової води за індексами забруднення води (ІЗВ та модифікований ІЗВ), комбінаторним індексом забруднення води, інтегральне оцінювання якості

води за коефіцієнтом забруднення води χ з пріоритетами і без пріоритетів [8, 9] за загальноприйнятими методиками [10–16] відповідно до показників нормативів усіх видів водокористувачів [17] довели необхідність проведення наступного етапу оцінювання екологічного стану поверхневих вод р. Дніпро в межах Черкаського регіону за показниками екологічного стану та визначення здатності водного об'єкта до саморегуляції і самовідновлення [9].

Методика проведення оцінки екологічного стану за комплексними показниками екологічного стану (КПЕС) передбачає розрахунок показників за блоками показників якості з урахуванням ефекту сумачії (спільної дії гідрохімічних інгредієнтів за лімітуючою ознакою шкідливості (ЛОШ)) [18, 19]. Були виконані розрахунки для поста спостережень р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) питний в/з м. Черкаси (678 км від гирла) за 2021–2024 роки за нормативами якості води поверхневих водних об'єктів рибогосподарського призна-

чення, як найбільш чутливих до зміни якості води. Далі проведена оцінка екологічного стану за наступною класифікацією [18, 19]:

при $КПЕС_{\min} < 0$ і $КПЕС_{\text{сер}} < 0$ – стан нестійкий;
при $КПЕС_{\min} > 0$ і $КПЕС_{\text{сер}} > 0$ – стан стійкий;
при $КПЕС_{\min} < 0$ і $КПЕС_{\text{сер}} > 0$ – стан стійкий з ознаками нестійкості.

Перші два пункти класифікації екологічного стану визначають необхідність розробки та проведення в екосистемі природоохоронних заходів.

Приклад розрахунку КПЕС та визначення екологічного стану водного об'єкта наведено в таблиці 1.

Зведені результати оцінки екологічного стану р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) питний в/з м. Черкаси (678 км від гирла) за 2021–2024 рр. свідчать про стабільний “нестійкий” екологічний стан ділянки р. Дніпро в межах території дослідження (таблиця 2).

На наступному етапі була розрахована екологічна надійність на ділянці р. Дніпро в межах Черкаського

Таблиця 1

Оцінювання якості води за комплексним показником екологічного стану р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) за рибогосподарськими нормативами за 2024 рік

ЛОШ	Показники	C_i мг/дм ³	$ГДК_i$ мг/дм ³	$ГДК_i - C_i$	ПЕС	КПЕС
–	Завислі речовини	11,5	20	8,5	0,425	
–	БСК ₅	2,1	3,0	0,9	0,3	
–	Розчинений кисень	8,4	6,0	2,4	0,4	
–	ХСК	43,2	20	–23,2	–1,16	
Σ					–0,035	–0,009
Токсико-логічна	Амоній	0,40	0,50	–	0,8	
	Нітрити	3,0	0,08	–	37,5	
Σ					38,3	–37,3
Санітарно-токсико-логічна	Хлориди	16,3	300	–	0,054	
	Сульфати	24,25	100	–	0,242	
	Нітрати	2,6	40	–	0,065	
	Фосфати	0,5	3,5	–	0,143	
Σ					0,504	0,496
Рибогоспо-дарська	Нафто-продукти	–	0,05	–	–	–
$КПЕС_{\text{сер}} = (-0,009 - 37,3 + 0,496) / 3 = -12,27$, $КПЕС_{\min} = -37,3$ (екологічний стан об'єкта нестійкий)						

Таблиця 2

Зведені результати оцінки якості води за КПЕС р. Дніпро – с. Сокирне (Кременчуцьке водосховище) за 2022–2024 роки

Рік	Комплексний показник КПЕС		Екологічний стан ділянки річки
	$КПЕС_{\text{сер}}$	$КПЕС_{\min}$	
2021	–19,33	–58,5	нестійкий
2022	–13,99	–42,3	нестійкий
2023	–13,28	–40,2	нестійкий
2024	–12,27	–37,3	нестійкий

регіону в часі (за 2021–2024 рр.). Отримані показники екологічної надійності ($EH = 0,77$) відповідають низькому рівню саморегуляції та самовідновлення (рівень низький ($EH < 0,8$)).

Головні висновки. Виконано дослідження екологічного стану поверхневих вод за комплексним показником екологічного стану для річки Дніпро в межах Черкаського регіону відповідно до рибогосподарських нормативів поверхневих водних об'єктів у часі. За період спостережень (2021–2024 роки) екологічний стан оцінюється як нестійкий, а показник екологічної надійності свідчить про низький рівень саморегуляції та самовідновлення ділянки річки в межах території дослідження, що вказує на необхідність впровадження заходів, які забезпечать змен-

шення обсягів надходження неочищених стічних вод, а саме, реконструкцію існуючих очисних споруд та будівництво нових.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати роботи можуть бути враховані при проведенні наукових досліджень тенденцій змін екологічного стану поверхневих вод середньої частини басейну р. Дніпро, при прогнозуванні наслідків антропогенного впливу на поверхневі води р. Дніпро в межах Черкаського регіону. Отримана інформація буде сприяти удосконаленню процесу обробки результатів спостережень і контролю стану гідроекосистем та допомагати організації раціонального комплексного управління поверхневими водними ресурсами басейнів річок України.

Література

1. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області у 2023 році. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamku/ekologichnyj-monitoryng/regionalni-dopovidi-prostan-navkolyshnogo-seredovyshha-v-ukrayini/> (дата звернення: 23.10.2025).
2. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Черкаській області у 2024 році. URL: <https://ck-oda.gov.ua/ekologiya/> (дата звернення: 23.10.2025).
3. Екологічний паспорт Черкаської області. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://ck-oda.gov.ua/wp-content/uploads/2025/10/Ekopasport_za_2024_r.pdf (дата звернення: 23.10.2025).
4. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та відновлення в Україні у 2023 році. Київ. 2024. 438 с.
5. Закон України “Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики на період до 2030 року”. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 19.10.2025).
6. Про гідрологічний режим водних об'єктів України, що склався у вересні 2025 року. URL: https://www.meteo.gov.ua/ua/Misyachnii-ohlyad?fbclid=IwY2xjawMpGC5leHRuA2F1bQ1xMABicmlkETFaaXhzMUUV2S0xRSVdWTEhPAR5MFlA3DRbiw9TEOu3cPmAtJh8QNmhF9vHCuWyXprIjLZi81ov7J_xqmQiEFg_aem_6KkPdhuYnZAYS09krfPeQw (дата звернення: 23.10.2025).
7. Інформація щодо якості води джерела водопостачання з 13.10.25 по 19.10.25 року. *КП “Кременчукводоканал”*: веб-сайт. URL: <https://kvk.pl.ua/uk/iakist-vodi/> (дата звернення: 23.10.2025).
8. Шахман І. О., Бистрянцева А. М. Оцінювання якості води річки Дніпро в межах Черкаської області. *Екологічні науки*. 2023. № 2 (47). С. 91–95.
9. Шахман І. О., Бистрянцева А. М., Чвартковська А. О. Актуальна динаміка показників якості води річки Дніпро в межах Черкаської області. *Екологічні науки*. 2025. Вип. № 3 (60). С. 26–30.
10. Юрасов С. М., Кур'янова С. О., Юрасов М. С. Комплексна оцінка якості вод за різними методиками та шляхи її вдосконалення. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2009. № 5. С. 42–53.
11. Шахман І. О., Лобода Н. С. Оцінка якості води у створі р. Інгулець – м. Снігурівка за гідрохімічними показниками. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 17, С. 123–136.
12. Shakhman I. A., Bystriantseva, A. N. Assessment of ecological state and ecological reliability of the Lower section of the Dnieper River // *18th International Multidisciplinary scientific Geoconference SGEM*, Albena, Bulgaria, July 2–8, 2018. Vol-18.
13. Iryna Shakhman, Anastasiia Bystriantseva Environmental approach to assessment of the response of hydroecosystems to anthropogenic load. New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries: monograph. 7th ed. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”. 2019. P. 281–301.
14. Шахман І. О. Екологічна оцінка якості води середньої течії річки Південний Буг за гідрохімічними показниками. *Таврійський науковий вісник*. 2020. Вип. 113. С. 260–266.
15. Iryna Shakhman, Anastasiia Bystriantseva Water Quality Assessment of the Surface Water of the Southern Bug River Basin by Complex Indices. *Journal of Ecological Engineering*. 2020. Volume 22, Issue 1, P. 195–205.
16. Iryna Shakhman, Anastasiia Bystriantseva Spatio-Temporal Analysis of the Ecological State of the Dniester River Transboundary Water. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. Volume 22, Issue 9, P. 119–127.
17. Клименко М. О., Вознюк Н. М., Вербецька К. Ю. Порівняльний аналіз нормативів якості поверхневих вод. *Наукові доповіді НУБіП України*. 2012-8 (30). URL: http://nd.nubip.edu.ua/2012_1/12kmo.pdf (дата звернення: 03.03.2023).

18. Shakhman I. A., Bystriantseva, A. N. Assessment of Ecological State and Ecological Reliability of the Lower Section of the Ingulets River. *Hydrobiological Journal*. 2017. Volume 53. Issue 5. P. 103–109.

19. Шахман І.О. Оцінка екологічного стану та екологічної надійності пониззя річки Дніпро. *Екологічні науки*. 2019. № 1(24). Т. 1. С. 117–120.

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

КОНТРОЛЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИТЯЖКИ ҐРУНТУ ІМПЕДАНСНИМ МЕТОДОМ

Босюк А.С., Себко К.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua, Kiril.Sebko@mit.khpi.edu.ua

У статті представлено результати дослідження імпедансного метода для оцінювання електрофізичних параметрів ґрунтових витяжок у зонах техногенного навантаження. Розроблено алгоритм обчислення параметрів опору, індуктивності та фазового кута зсуву у моделях, що описують поведінку електричних сигналів у витяжці ґрунту 1:5. Запропоновано послідовність розрахункових процедур, що базується на визначенні частоти струму f , питомого опору ρ та температури t . Отримані залежності дозволяють визначити зміну параметра x у діапазоні від 1 до 4, що забезпечує точність спільного визначення фізико-хімічних параметрів витяжки. Порівняння теоретичних і експериментальних даних підтвердило кореляцію між електропровідністю, добротністю та фазовим зсувом сигналу, що свідчить про адекватність моделі. Дослідження включає аналіз впливу техногенного забруднення на електрофізичні характеристики ґрунтів, зокрема в регіонах із високим рівнем промислової активності. Отримані результати можуть бути використані для створення систем оперативного контролю стану ґрунтів, оптимізації процесів очищення стічних вод і моніторингу екологічної безпеки промислових територій. Запропонований підхід забезпечує неінвазивний аналіз у реальному часі, що є особливо актуальним для регіонів із підвищеним техногенним навантаженням, таких як Харків, де воєнні дії сприяють накопиченню токсичних речовин у ґрунтах. Перспективи подальших досліджень передбачають удосконалення алгоритмів обробки даних для підвищення чутливості методу до низькоконцентрованих забруднювачів, а також інтеграцію отриманих моделей у геоінформаційні системи для просторового аналізу забруднення. Подальше застосування включає створення бази електрофізичних еталонів для ґрунтів України та розробку автоматизованих систем моніторингу для оцінки ефективності технологій очищення. Запропонований метод може бути адаптований для інших типів природних середовищ, таких як водні об'єкти чи осадові породи, що розширює його практичне значення. *Ключові слова:* імпедансний метод, електропровідність, ґрунтова витяжка, техногенне забруднення, фазовий зсув, індуктивність, електричний опір, моніторинг ґрунтів, очищення стічних вод.

Control of electrical and temperature parameters of soil extraction by the impedance method. Bosiuk A., Sebko K.

The article presents the results of research into the impedance method for evaluating the electrophysical parameters of soil extracts in areas of technogenic load. An algorithm has been developed for calculating the parameters of resistance, inductance and phase shift angle in models describing the behaviour of electrical signals in a 1:5 soil extract. A sequence of calculation procedures based on the determination of current frequency f , specific resistance ρ and temperature t is proposed. The obtained dependencies allow determining the change in parameter x in the range from 1 to 4, which ensures the accuracy of the joint determination of the physicochemical parameters of the extract. A comparison of theoretical and experimental data confirmed the correlation between electrical conductivity, quality factor and phase shift of the signal, which indicates the adequacy of the model. The study includes an analysis of the impact of anthropogenic pollution on the electrophysical characteristics of soils, particularly in regions with high levels of industrial activity. The results obtained can be used to create systems for operational control of soil condition, optimisation of wastewater treatment processes, and monitoring of environmental safety in industrial areas. The proposed approach provides non-invasive real-time analysis, which is particularly relevant for regions with high technogenic loads, such as Kharkiv, where military operations contribute to the accumulation of toxic substances in the soil. Prospects for further research include improving data processing algorithms to increase the sensitivity of the method to low-concentration pollutants, as well as integrating the resulting models into geographic information systems for spatial analysis of pollution. Further applications include the creation of a database of electrophysical standards for Ukrainian soils and the development of automated monitoring systems to evaluate the effectiveness of purification technologies. The proposed method can be adapted for other types of natural environments, such as water bodies or sedimentary rocks, which expands its practical significance. *Key words:* impedance method, electrical conductivity, soil extract, anthropogenic pollution, phase shift, inductance, electrical resistance, monitoring, wastewater treatment.

Постановка проблеми. В сучасних умовах зростання техногенного навантаження на довкілля особливої актуальності набувають методи контролю стану ґрунтів. Під впливом промислових підприємств, транспорту та сільськогосподарської діяльності у ґрунтового середовищі відбувається накопичення важких металів, органічних сполук

і токсичних речовин, що суттєво змінює його фізико-хімічні властивості. Для своєчасного виявлення таких змін необхідні ефективні, інформативні та недеструктивні методи аналізу. Забруднення ґрунтів в результаті антропогенного впливу – одна з актуальних екологічних проблем сучасності. Особливо гостро вона проявляється у регіонах, що зазнали

впливу внаслідок бойових дій, де відбувається руйнування інфраструктури, викиди токсичних речовин, а також пошкодження промислових об'єктів створюють умови для накопичення в ґрунті шкідливих компонентів. Харків, як великий промисловий і транспортний центр України, унаслідок військових дій має підвищений ризик техногенного забруднення ґрунтів, що загрожує екологічній безпеці регіону. Одним із перспективних підходів є використання імпедансних методів, які ґрунтуються на вимірюванні електричного опору та реактивних складових струму у зразках ґрунтів або їхніх водних витяжках. На відміну від традиційних хімічних методів, імпедансні технології не потребують тривалої підготовки проб і дозволяють проводити оперативний моніторинг у лабораторних або польових умовах. Перевагою імпедансного аналізу є його висока чутливість до змін концентрації іонів, вологості, структури порового простору та температури середовища. Це дає змогу встановлювати залежності між електрофізичними параметрами ґрунтових розчинів і рівнем їх забруднення, визначати ефективність технологій очищення та прогнозувати подальший стан ґрунтової системи. Традиційні методи контролю забруднення ґрунтів є трудомісткими, потребують значних витрат часу та реагентів, а також передбачають руйнування зразків під час аналізу [1–4]. Це ускладнює проведення оперативного моніторингу, особливо в зонах підвищеного техногенного ризику. У зв'язку з цим виникає науково-практична проблема – розробити та обґрунтувати застосування ефективних неструктурних методів контролю стану ґрунтів, здатних відображати їх електрофізичні властивості й реагувати на зміни концентрації іонів у ґрунтових витяжках. Використання багатопараметрових і багаточастотних вимірювальних схем забезпечує більш повну характеристику досліджуваних зразків і дозволяє одночасно оцінювати фізико-хімічні параметри витяжки. Імпедансні методи контролю відкривають нові можливості для неінвазивної діагностики стану ґрунтів, підвищення ефективності систем очищення та забезпечення екологічної безпеки територій у зонах техногенного навантаження.

Актуальність дослідження. У сучасних умовах зростання техногенного навантаження на довкілля проблема забруднення ґрунтів набуває критичного значення, особливо в промислових регіонах, таких як Харків. Імпедансний метод забезпечує швидкий і неструктурний контроль електрофізичних параметрів ґрунтових витяжок, що дозволяє оперативно виявляти зміни, спричинені важкими металами та токсичними речовинами. Розробка таких методів є актуальною для забезпечення екологічної безпеки та прогнозування деградації природних ресурсів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження авторів сприяє розвитку неінвазивних методів моніторингу стану ґрунтів, що є важливим

для вирішення екологічних проблем у зонах техногенного впливу. Запропонований алгоритм імпедансного аналізу дозволяє одночасно оцінювати електропровідність, температуру та фазові характеристики, що підвищує ефективність діагностики забруднень і оптимізації процесів очищення стічних вод. Отримані результати створюють основу для створення автоматизованих систем контролю, які можуть бути застосовані в лабораторних і польових умовах для забезпечення екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні наукові праці [5–9] демонструють значний прогрес у застосуванні імпедансних методів для оцінки стану ґрунтів і ґрунтових витяжок у зонах техногенного навантаження. У роботі [5] розроблено модель електрохімічного імпедансу з використанням скінченно-елементного методу для аналізу ґрунтових характеристик, що дозволяє підвищити точність вимірювань. Автори [6] досліджують діелектричний аналіз вологості ґрунту за допомогою об'ємної електричної томографії, акцентуючи на чутливості до іонного складу. В дослідженні [7] узагальнюють прогрес у сенсорних технологіях для виявлення забруднень, зокрема важких металів, за допомогою імпедансних методів. Автори [8] презентують прототип сенсора електропровідності, підтверджуючи його ефективність для *in-situ* моніторингу. У дослідженні [9] застосовують нейронні мережі для аналізу імпедансних спектрів, що забезпечує точну оцінку концентрації нітратів у ґрунті, демонструючи чутливість методу до забруднювачів. Ці дослідження доводять, що імпедансна спектроскопія є потужним інструментом для контролю вологості, солоності та вмісту важких металів, а також створення моделей і сенсорних систем для моніторингу стану ґрунтів у лабораторних і польових умовах. Вітчизняні дослідження [10, 11] сприяють розвитку практичного застосування імпедансних методів для контролю стану ґрунтів у реальних умовах. У роботі [10] розглядається використання електричної імпедансної томографії для картирування електропровідності ґрунту, акцентуючи увагу на впливі вологості та іонного складу порового простору, що є ключовим для оцінки ґрунтових витяжок. Автори [11] досліджують просторову варіацію електропровідності в міських парках, враховуючи вплив рельєфу, вологості та температури, і пропонують підходи до побудови електрофізичних моделей із температурними поправками для підвищення точності вимірювань.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Однак, у більшості робіт вітчизняних та закордонних авторів відсутня системна оцінка впливу комплексних факторів (температура, концентрація іонів, частотна залежність) на параметри імпедансу в широкому діапазоні частот. При цьому, більшість моделей не враховує нелінійність поведінки систем у зонах сильного забруднення; не поєднано елек-

тричні, індуктивні та фазові параметри в єдину модель. Недостатньо розроблені алгоритми для оцінювання комплексного параметра, який би враховував і температуру, і концентрацію забруднювачів; мало уваги приділено калібруванню методів під конкретні типи ґрунтів України. Отже, попередні дослідження заклали основу для розвитку імпедансних методів, проте залишили невирішеними питання узагальнення результатів і створення багатопараметрових моделей, здатних оцінювати стан ґрунтових витяжок за комплексом електричних та температурних характеристик. Саме ці аспекти становлять наукову новизну подальших робіт у цьому напрямі.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є експериментальний контроль електропровідності та температури витяжки ґрунту 1:5 за допомогою імпедансного методу при фіксованій частоті магнітного поля. Для досягнення мети було поставлено такі завдання:

- навести схему вимірювального пристрою для високочастотного контролю;
- здійснити вимірювання електропровідності при різних температурах;
- провести аналіз залежності електропровідності від температури.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у впровадженні високочутливого імпедансного методу контролю витяжки ґрунту 1:5, що дозволяє точно вимірювати електропровідність, фазовий кут та узагальнений параметр x . Розроблено алгоритм, який враховує внутрішню та зовнішню індуктивність досліджуваного середовища, а також можливість компенсації ємності, що підвищує точність визначення електрофізичних характеристик.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання розробленого імпедансного методу для швидкого та неструктивного контролю стану ґрунтів у лабораторних і польових умовах. Розроблений алгоритм, який передбачає компенсацію ємності, дозволяє підвищити точність вимірювань електропровідності та фазових характеристик.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні частотного діапазону вимірювань для підвищення чутливості та точності імпедансного контролю ґрунту. Застосування розробленого методу для польових умов у зонах підвищеного техногенного та воєнного навантаження, включаючи оперативний контроль ефективності технологій очищення ґрунтів.

Методика експерименту. Дослідження проводили на витяжках ґрунту у співвідношенні 1:5 (ґрунт: дистильована вода). Імпеданс вимірювали на частоті 28 МГц за допомогою багатопараметрової вимірювальної системи із вихорострумовим перетворювачем (ВП) радіусом $a = 60$ мм. Температура контрольованого середовища змінювалася у межах $t = 0-30$ °C.

Результати та обговорення. У ході експерименту встановлено, що електропровідність витяжки

ґрунту σ зростає лінійно зі збільшенням температури. Це узгоджується з теоретичними уявленнями про підвищення рухливості іонів у рідкому середовищі при нагріванні. Після температурної корекції значення електропровідності при $t = 15$ °C, дозволяють оцінити реальний рівень іонної концентрації, пов'язаної з наявністю розчинних солей важких металів. Отримані дані свідчать, що в пробах із ділянок, наближених до зони воєнних дій, електропровідність у 1,5–2 рази перевищує показники фонових зразків, що підтверджує наявність техногенного забруднення.

Параметр x вимірюється у діапазоні від 1 до 4. Алгоритм розрахункових процедур наступний. Спочатку задають величину x , яка виражається за формулою 1:

$$x = a \sqrt{\frac{2\pi\mu_0\mu_r f}{\rho}}, \quad (1)$$

де μ_0 – магнітна стала, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ_r і ρ – відносна магнітна проникність і питомий електричний опір водної витяжки; f – частота зміни струму в пробниці; a – його радіус.

Потім задають значення a ; μ_r ; ρ , струму I , довжини l пробниці з рідиною (значення μ_r і ρ беруться при температурі, тобто при 10 °C).

Після цього на основі (1) знаходять значення частоти f за формулою 2:

$$f = \frac{x^2 \rho}{2\pi a^2 \mu_0 \mu_r} \quad (2)$$

Потім визначають опір R_0 стержня постійного струму, тобто при $f = 0$ за формулою 3:

$$R_0 = \rho \frac{l}{S}, \quad (3)$$

де S – площа поперечного перерізу стержня.

Далі знаходять електричний опір R стержня при частоті $f > 0$ за формулою 4:

$$R = R_n \cdot R_0, \quad (4)$$

де R_n визначається з табл. 1 для заданого x .

Для того ж значення x , користуючись залежністю L_{in} від x , знаходять значення L_{in} , а за ним визначають величину внутрішньої індуктивності L , виходячи із співвідношення 5:

$$L = L_i + L_e, \quad (5)$$

де L_e – зовнішня індуктивність стержня, зумовлена магнітним потоком поза стержнем.

Величину L_e визначають за формулою 8:

$$L_e = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 \right) \quad (8)$$

На практиці користуються величиною L_p , оскільки параметр L_e можна скомпенсувати компенсуючою ємністю C_k , яка включається послідовно з сумарною індуктивністю і розраховується за формулою 9:

Залежності параметрів R_n и L_{in} від x

x	R_n	L_{in}	x	R_n	L_{in}
0,2	1,0000085	0,9999958	5	2,0430805	0,5558596
0,4	1,0001347	0,9999327	5,2	2,1138828	0,5349568
0,6	1,0006791	0,9996604	5,4	2,1842315	0,5155657
0,8	1,0021404	0,9989299	5,6	2,2542759	0,4975512
1	1,0052074	0,9973972	5,8	2,3241446	0,4807808
1,2	1,0107430	0,9946324	6	2,3939385	0,4651299
1,4	1,0197491	0,9901386	6,2	2,4637304	0,4504857
1,6	1,0333095	0,9833831	6,4	2,5335678	0,4367483
1,8	1,0525054	0,9738424	6,6	2,6034768	0,4238298
2	1,0783055	0,9610626	6,8	2,6734678	0,4116542
2,2	1,1114428	0,9447247	7	2,7435404	0,4001553
2,4	1,1522980	0,9247080	7,2	2,8136871	0,3892756
2,6	1,2008186	0,9011327	7,4	2,8838974	0,3789649
2,8	1,2564961	0,8743704	7,6	2,9541596	0,3691789
3	1,3184180	0,8450145	7,8	3,0244628	0,3598786
3,2	1,3853844	0,8138140	8	3,0947974	0,3510288
3,4	1,4560642	0,7815862	8,2	3,1651558	0,3425981
3,6	1,5291554	0,7491267	8,4	3,2355323	0,3345580
3,8	1,6035155	0,7171356	8,6	3,3059229	0,3268825
4	1,6782422	0,6861713	8,8	3,3763249	0,3195479
4,2	1,7527019	0,6566324	9	3,4467369	0,3125322
4,4	1,8265139	0,6287648	9,2	3,5171579	0,3058156
4,6	1,8995078	0,6026831	9,4	3,5875876	0,2993796
4,8	1,9716683	0,5784007	9,6	3,6580259	0,2932072

$$C_k = \frac{1}{\omega^2 L_e} \quad (9)$$

де ω – циклічна частота, $\omega = 2\pi f$.

Величину C_k можна скомпенсувати у схемі на рис. 1.

До схеми входить генератор–Г; Частотомер–Ч; Амперметр–А; катушка взаєміндуктивності–КВ; компенсуюча ємність– C_k ; фазометр–Ф; вихорострумний перетворювач–ВП (умовно позначений послідовним включенням опору та індуктивності).

Знаходимо напругу на пробниці U_{nk} при наявності компенсації за формулою 10:

$$U_{nk} = \sqrt{R^2 + (\omega L_i)^2} \cdot I \quad (10)$$

А фазовий кут φ_k зсуву між I і U_{nk} , знаходимо за формулою 11:

$$\operatorname{tg} \varphi_k = \frac{\omega L_i}{R} \quad (11)$$

Якщо компенсації немає, то напругу на кінцях пробниці визначаємо, виходячи із співвідношення 12:

$$U_n = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \cdot I \quad (12)$$

А фазовий кут між I і U_n визначаємо з виразу 13:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad (13)$$

Питому електричну провідність витяжки, знаходимо із співвідношення 14:

$$\sigma_t = x^2 / (2\pi a^2 \mu_0 f) \quad (14)$$

Температуру рідини знаходимо із співвідношення 15:

$$\sigma_t = \sigma_1 \cdot (1 + \alpha \cdot (t - 10)) \quad (15)$$

Результати визначення питомої електричної провідності σ та параметрів ВП наведено у табл. 2. Температуру витяжки вимірювали за допомогою термометри ТХК.

Згідно з даними табл. 2, спостерігається закономірне зростання електропровідності та зниження опору зразків зі збільшенням параметра x , що відповідає підвищенню концентрації іонів у витяжці. Одночасно зі збільшенням частоти струму змінюються реактивні складові імпедансу, що свідчить

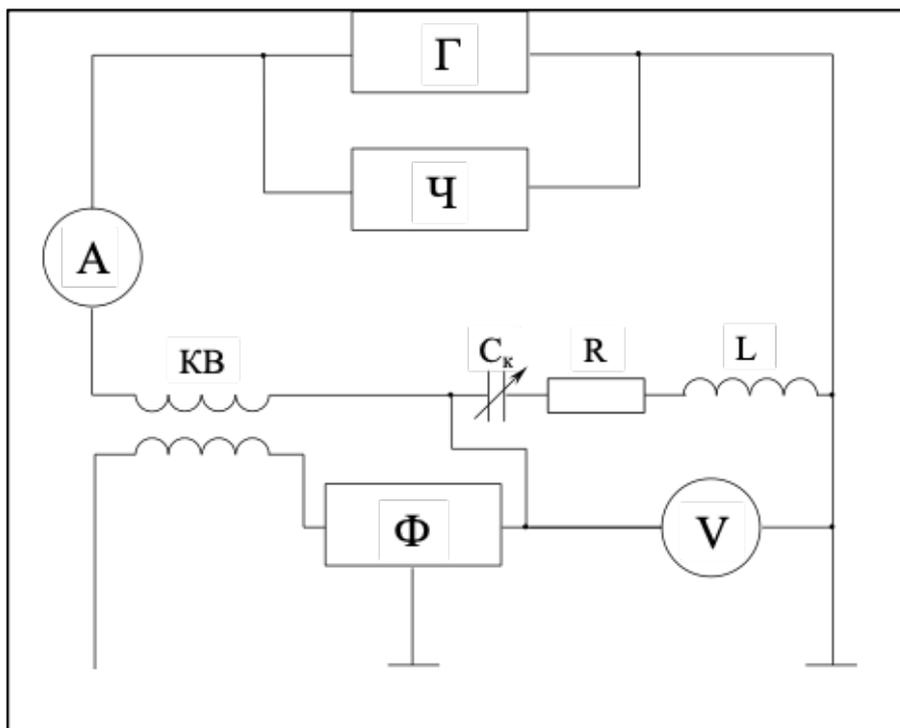


Рис. 1. Схема реалізації імпедансного методу з пробницею рідини

Таблиця 2

Результати визначення параметрів витяжки та ВП:
 $t_0 = 15^\circ\text{C}; f = 28 \text{ МГц}; \alpha = 1,69 \cdot 10^{-2} \text{ 1}^\circ\text{C}; t = [15 \dots 30^\circ\text{C}]$

t, °C	R ₀ , Ω	R, Ω	x	R _н	L _н
10	0.1167	8.57	1.0	1.0052	0.9974
12	0.1200	8.33	2.0	1.0783	0.9611
14	0.1233	8.11	2.5	1.1394	0.9320
16	0.1266	7.90	3.0	1.3184	0.8450
18	0.1299	7.70	3.5	1.4561	0.7816
20	0.1332	7.51	4.0	1.6782	0.6862
22	0.1365	7.33	4.0	1.6782	0.6862
24	0.1398	7.15	4.0	1.6782	0.6862
26	0.1431	6.99	4.0	1.6782	0.6862
28	0.1464	6.83	4.0	1.6782	0.6862
30	0.1497	6.68	4.0	1.6782	0.6862

про перерозподіл струмів провідності та поляризації в середовищі. Це підтверджує адекватність вибраної моделі та ефективність багатопараметрового підходу. Застосування імпедансного підходу на базі вихорострумів перетворювача (ВП), забезпечує високу точність вимірювань, швидкість аналізу та можливість автоматизації процесу контролю.

Головні висновки. Таким чином, в ході виконання дослідження досягнуто поставленої мети – експериментально оцінено електрофізичні параметри ґрунтових витяжок та проаналізовано вплив температурних чинників на результати імпедансних вимірювань. Реалізований алгоритм розрахунків дозволив встановити залежності між параметрами електропровідності, температури і узагальненого параметра x . Отримані результати дають змогу зробити висновок, що імпедансний метод контролю є чутливим і надійним інструментом для оцінки стану ґрунтів у зонах техногенного забруднення. Його застосування дозволяє визначати зміни у фізико-хімічному складі ґрунтових розчинів без руйнування зразків, а також оптимізувати процеси

очищення. У перспективі доцільним є розширення частотного діапазону вимірювань, удосконалення алгоритмів розрахунку узагальненого параметра x і використання отриманих результатів для створення бази електрофізичних еталонів ґрунтів різного типу та ступеня забруднення. Це сприятиме підвищенню ефективності екологічного моніторингу та розробці нових методів неінвазивного контролю природних середовищ.

Перспективи використання результатів дослідження. Розроблений імпедансний метод відкриває можливості для створення автоматизованих систем оперативного моніторингу стану ґрунтів у зонах техногенного та воєнного навантаження. Результати дослідження можуть бути використані для формування бази електрофізичних еталонів ґрунтів України, що сприятиме точній оцінці забруднень і ефективності технологій очищення. Подальше розширення частотного діапазону та вдосконалення алгоритмів підвищить чутливість методу, забезпечуючи його застосування в польових умовах для прогнозування екологічних ризиків.

Література

1. Sun F., He B., Han P. Assessment and modelling of soil moisture content in silty loess using electrochemical impedance spectroscopy. *CATENA*. 2025. Vol. 259. P. 109408. DOI: 10.1016/j.catena.2025.109408
2. Shuquan P., Fan W., Ling F. Study on Electrochemical Impedance Response of Sulfate Saline Soil. *International Journal of Electrochemical Science*. 2019. Vol. 14(9). P. 8611–8623. DOI: 10.20964/2019.09.30
3. Ma M., Fang L., Zhao N., Ma X. Detection of Cadmium and Lead Heavy Metals in Soil Samples by Portable Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Chemosensors*. 2014. Vol. 12(3). P. 40. DOI: 10.3390/chemosensors12030040
4. Cao X., Li Z., Yao S. Analysis on the Phase Frequency Characteristic of Soil Impedance. *Energy and Power Engineering*. 2018. Vol. 10(04). P. 17–24. DOI: 10.4236/epe.2018.104b003
5. Abbas Y., van Smeden L., Verschuieren A. R. M., Zevenbergen M. A. G., Oudenhoven J. F. M. Modeling Electrochemical Impedance Spectroscopy Using Time-Dependent Finite Element Method. *Sensors*. 2024. Vol. 24(22). P. 7264. DOI: 10.3390/s24227264
6. Muhammad M., Almushfi S. Dielectric Analysis Model for Measurement of Soil Moisture Water Content Using Electrical Capacitance Volume Tomography. *Modern Applications of Electrostatics and Dielectrics*. 2020. DOI: 10.5772/intechopen.89057
7. Singha R., Singha S., Ruben V. M., Haokip A. D. Advances in Sensor Technologies for Detecting Soil Pollution. *Sensors for Environmental Monitoring, Identification, and Assessment*. 2024. P. 218–230. DOI: 10.4018/979-8-3693-1930-7.ch014
8. Song R., Zhang M. Design and Performance Evaluation of an In Situ Online Soil Electrical Conductivity Sensor Prototype Based on the High-Performance Integrated Chip AD5941. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14(17). P. 7788. DOI: 10.3390/app14177788
9. Ma X., Bifano L., Fischerauer G. Evaluation of Electrical Impedance Spectra by Long Short-Term Memory to Estimate Nitrate Concentrations in Soil. *Sensors*. 2023. Vol. 23(4). P. 2172. DOI: 10.3390/s23042172
10. Поплавський В. М., Нікорич В. А., Гуцул Т. В. Аналіз методів виявлення наземних мін та значення вивчення ґрунтових властивостей для їх ефективного застосування. *Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія (Біологічні системи)*. 2024. Том. 16. №1. С. 160–167. DOI: 10.31861/biosystems2024.01.160
11. Kunakh O. M., Yorkina N. V., Zhukov O. V., Turovtseva N. M., Bredikhina Y. L., Logvina-Byk T. A. Recreation and terrain effect on the spatial variation of the apparent soil electrical conductivity in an urban park. *Biosystems Diversity*. 2020. Vol. 28(1). P. 3–8. DOI: 10.15421/012001

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЗМІНИ ПОКАЗНИКІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА БІОЛОГІЧНОЇ УРОЖАЙНОСТІ ГІБРИДІВ *HELIANTHUS ANNUUS* L. ЗА РІЗНИХ УМОВ ЗАПИЛЕННЯ

Герасимюк П.В., Федоряк М.М.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
вул. М. Коцюбинського, 2, 58000, м. Чернівці
herasymiuk.pavlo@chnu.edu.ua, m.fedorciak@chnu.edu.ua

Робота присвячена дослідженню впливу ізоляції вільного доступу комах-запилювачів на продуктивність та біологічну урожайність п'яти лінолевих самофертильних гібридів *Helianthus annuus* L. чотирьох компаній-виробників («Limagrain», «Euralis», «Syngenta», «MAS Seeds»). Полігоном для досліджень стали дослідні поля, підпорядковані агрохолдингу «Континентал Фармерз Груп» («Мрія Фармінг Тернопіль»), що розташовані в адміністративних межах с. Хоростків Тернопільської області України. Експериментальна частина дослідження включала два етапи: польовий та лабораторний. Дизайн експерименту передбачав формування двох груп рослин для кожного гібриду соняшнику: контрольної (рослини вільно запилювалися комахами) та дослідної (кошики соняшнику в період цвітіння ізолювали від запилення комахами за допомогою агроволокняного сітчастого ізоляційного чохла). Визначено такі параметри: загальна кількість сім'янок у кошику, загальна маса сім'янок кошика, маса 1000 штук, а також розраховано біологічну урожайність. В результаті проведених досліджень доведено позитивний вплив комахозапилення (зокрема, у 3-х з 5-ти досліджуваних гібридів за всіма досліджуваними параметрами). Показано, що за умов обмеження вільного доступу комах-запилювачів кількість сім'янок зменшувалася з варіюванням середніх значень в діапазоні 4,3-12,3 %, загальна маса сім'янок – 1,7-45,4 %, маса 1000 штук – 1,2-37,0 %, що в сукупності обумовило зменшення біологічної урожайності на 1,7-45,3 %. При цьому, найбільш «чутливим» до відсутності комах-запилювачів виявився показник загальної маси сім'янок, а з-поміж гібридів – LG 5478. Грунтуючись на отриманих результатах, ми рекомендуємо у даних (або подібних) ґрунтово-кліматичних умовах з урахуванням комахозапилення культивувати соняшник гібриду ES Rosalia, оскільки рослини найкраще себе проявили за більшістю досліджених параметрів. *Ключові слова:* *Helianthus annuus* L., самофертильні гібриди, соняшник, комахозапилення, ізоляційні чохла, показники продуктивності, біологічна урожайність, насіння, агрокосистеми.

Changes in productivity parameters and biological yield of *Helianthus annuus* L. hybrids under different pollination conditions. Herasymiuk P., Fedoriak M.

Sunflower (*Helianthus annuus* L.) is one of the most important global oilseed crops and a strategic agricultural commodity in Ukraine, occupying more than 20% of the country's arable area. Its high adaptability to diverse soil and climatic conditions, along with the availability of tolerant genotypes and the increasing demand for sunflower oil and seeds as valuable nutritional and bioactive resources, underlines the necessity for continuous improvement of productivity traits. Currently, the main direction in enhancing sunflower production involves the introduction of high-yielding self-fertile hybrids. However, despite the existence of nearly 1000 registered varieties and hybrids in Ukraine alone, comprehensive studies on the influence of various environmental and biological factors—particularly pollinator activity—on their productivity remain insufficient.

This study aimed to assess the effect of restricting insect pollinator access on the productivity and biological yield of five linoleic self-fertile sunflower hybrids produced by four breeding companies (“Limagrain,” “Euralis,” “Syngenta,” and “MAS Seeds”). The experiments were carried out in the research fields of the Continental Farmers Group (“Mriya Farming Ternopil”) located near Khorostkiv village, Ternopil region, Ukraine. The experimental design included two stages: field and laboratory. For each hybrid, two plant groups were established: (1) a control group freely pollinated by insects and (2) a treatment group with capitula isolated during anthesis using agro-fiber mesh enclosures to prevent insect visitation. Measured parameters included the total number of achenes per head, total seed mass per head, 1000-seed weight, and biological yield.

The results revealed a significant positive contribution of insect pollination to yield formation in three out of the five tested hybrids. Limiting pollinator access reduced the number of achenes by 4.3–12.3%, total seed mass by 1.7–45.4%, and 1000-seed weight by 1.2–37.0%, which jointly resulted in a decline in biological yield of 1.7–45.3%. The total seed mass proved to be the most sensitive trait to pollinator absence, with hybrid LG 5478 showing the highest dependence on bee-mediated pollination. Based on the results, the ES Rosalia hybrid demonstrated the best performance and stability under local agroecological conditions.

In conclusion, the findings confirm that even in self-fertile sunflower hybrids, insect pollination remains a critical factor influencing both quantitative and qualitative yield traits. These results highlight the importance of integrating pollinator-friendly practices and ecological management approaches into modern sunflower cultivation systems to maximize both agronomic efficiency and economic return. *Key words:* *Helianthus annuus* L., sunflower, self-fertile hybrids, insect pollination, exclusion cages, productivity parameters, biological yield, seeds, agroecosystems.

Постановка проблеми. На сьогодні основним напрямком збільшення виробництва соняшника (*Helianthus annuus* L.) є впровадження нових високорожайних самофертильних гібридів [10], зміни

показників продуктивності яких потребуються всебічного вивчення. Адже важко та майже неможливо охопити дослідження впливу різних факторів на урожайність відомих на даний час сучасних сортів

і гібридів *H. annuus*, лише в Україні їх зареєстровано ~1000 [12].

Актуальність дослідження. *H. annuus*, завдяки своїй здатності адаптуватися до різних ґрунтово-кліматичних умов та наявності толерантних генотипів [26], а також у зв'язку із зростаючим попитом на соняшникові олію і насіння (які визнані цінним ресурсом як у харчовому, так і в медичному аспектах, зокрема, як джерело поживних нутрієнтів і біологічно активних компонентів [23]), став ключовою олійною культурою світового значення [21], а в Україні й стратегічно важливим комерційним продуктом, адже частка соняшнику у структурі посівних площ є найвищою, складаючи >20 % [12]. При цьому, для з'ясування найбільш оптимальних особливостей культивування (враховуючи різні технології, підходи, природно-кліматичні умови та інші фактори), націлених на прояв максимальних показників потенційно закладених генетичних ознак (і відповідно на отримання високого агрономічного та економічного прибутку), актуальним постає дослідження впливу тих чи інших чинників, в тому числі наявність/відсутність комах-запилювачів, на поліпшення як кількісних, так і якісних характеристик продуктивності та й урожайності загалом.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження здійснювалося в рамках науково-дослідної роботи 51.000 «Аналіз впливу комах-запилювачів на врожайність перехреснозапилюваних культур» на дослідному полі агрохолдингу «Контінентал Фармерз Груп» («Мрія Фармінг Тернопіль»), результати яких частково висвітлені в працях [2, 7, 8, 14, 20].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У ряді наукових праць останніми роками дане питання фрагментарно вивчалось деякими зарубіжними [15, 16, 18, 27] і вітчизняними науковцями [1, 2, 7, 8, 9, 13, 14, 20], де вказується про сприятливий ефект наявності комах-запилювачів (зокрема, комах роду *Hymenoptera*, а саме *Apis mellifera* L.) на зростання окремих якісних та кількісних показників продуктивності, а також урожайності *H. annuus*.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття. У згаданих працях дослідження носять фрагментарний характер, адже очевидно, що неможливо охопити всю кількість відомих на сьогодні гібридів соняшника, враховуючи особливості зон їх культивування чи умов запилення. У даній статті висвітлені результати раніше не досліджуваних сучасних самофертильних гібридів соняшнику з метою доповнення розуміння щодо потенційного внеску комахо-запилення на вплив показників продуктивності та урожайності, щоб у подальшому отримувати максимальний прояв генетично закладених ознак, і відповідно агрономічний та економічний прибуток.

Новизна. Вперше показано вплив відсутності комах-запилювачів на продуктивність та урожай-

ність таких сучасних 5-ти гібридів соняшнику як: LG5478, ES Rosalia, MAS 81.K, SY Kupava, ES Bella, які представляють 4 компанії («Limagrain», «Euralis», «Syngenta», «MAS Seeds»).

Мета статті. Оцінити вплив ізоляції комах-запилювачів на деякі характеристики продуктивності та урожайності 5-ти сучасних самофертильних гібридів *Helianthus annuus* L.

Методологічна основа досліджень. Експериментальна частина роботи передбачала два етапи досліджень. Перший – польовий, де полігоном послуговували дослідні поля, підпорядковані агрохолдингу «Контінентал Фармерз Груп» («Мрія Фармінг Тернопіль»), що розташовані в адміністративних межах с. Хоростків Тернопільської області. Згідно фізико-географічного районування України територія полігону дослідження належить до Зони широколистяних лісів, Західноподільської височинної області [11]. Культивування соняшників здійснювалося відповідно до загальноприйнятих агротехнічних прийомів з належним контролем шкідників і забур'янення. Більш детально про дизайн експерименту можна ознайомитися у працях [2, 14]. Загалом для кожного гібриду було сформовано дві групи рослин: комахозапильна (контрольна) та ізольована (дослідна). У першому випадку, рослини мали доступ до вільного природного запилення комахами, адже відомо, що *H. annuus* – це ентомофільна культура, для якої під час цвітіння, щоб зав'язалися сім'янки, потрібні комахи-запилювачі, зокрема *Apis mellifera* L. [15]. У другому випадку, за 1-2 доби до цвітіння на кошики соняшників відповідного гібриду одягали так звані ізоляційний чохол (з нетканого агроволокна, забезпечуючи при цьому однотипність умов навколишнього середовища), тобто ізолювали вільний доступ представників *Insecta*. Після закінчення фази цвітіння, з дослідних груп рослин знімали ізолятори, вимірюючи діаметр диску кошика, для подальшого відбору аналогічних за розмірами діаметра кошика комахозапильних рослин. Відбирання, пакування, маркування та формування проб сім'янок *H. annuus*, методи його аналізу і вимірювання параметрів проводили з урахуванням вимог ДСТУ 4138-2002, ДСТУ 2240-93, ДСТУ 4694:2006, ДСТУ 7011:2009 [3, 4, 5, 6].

Другий етап досліджень – лабораторний, який передбачав здійснення вимірів для кожного окремого кошика у обох груп рослин загальної маси сім'янок, сумарного числа сім'янок, маси 1000 штук та розрахунку біологічної урожайності за алгоритмом наведеними у праці Федоряк та ін. [14]. Два останні параметри порівнювали потенційними показниками (вказаними для відповідних гібридів) на офіційних сайтах виробників (<https://agroexp.com.ua/uk/podsolnechnik-lg-5478-limagreyn-gibrid-semena-opisanie>, <https://agroexp.com.ua/uk/podsolnechnik-es-bella-euralis-gibrid-semena-opisanie>, <https://agro-trade.com.ua/ua/semena-podsolnechnika-lg-50510-lg50510>).

html, <https://aopplatforma.com/shop/seeds/sunflower/mas-81k?srsId=Afm>, <https://www.eridon.ua/si-kupava>, <https://www.agronom.info/ES-ROSALIA>.

Статистично достовірну відмінність досліджуваних показників між двома групами рослин (з вільним доступом комах-запилювачів та ізольованими) перевіряли за допомогою програмного забезпечення Statistica 12, використовуючи непараметричний парний критерій Вілкоксона, який рекомендовано застосовувати при співставленні залежних вибірок із розподілом, що відхиляється від нормального.

Викладення основного матеріалу. Однією з найбільш значимих прямих позитивних ознак, що впливає на зростання урожайності соняшника є кількість сім'янок на рослину [22]. Так, першим етапом наших досліджень став аналіз загальної кількості сім'янок у кошику 5-ти сучасних самофертильних гібридів *H. annuus*. При обговоренні згаданого показника використовуємо ботанічну термінологію (сім'янка), а при графічному відображенні даних – термінологію, подану в ДСТУ 7011:2009 (насінини), як загальноприйняту при обговоренні потреб виробництва та реалізації сільськогосподарської продукції [6]. Виявлено, що середня кількість сім'янок в кошику в залежності від гібриду та типу запилення варіює в межах від $1509,8 \pm 282,8$ шт. до $1797,3 \pm 424,6$ шт. Найвищі ж значення зафіксовані для гібриду LG 5478 компанії «Limagrain» у групі рослин з вільним доступом комах-запилювачів, а відносно найнижчі – в ізольованих рослин гібриду ES Rosalia компанії «Euralis». Згідно отриманих результатів, відмічено достовірно позитивний вплив комахозапилення на зростання загальної кількості сім'янок у кошику, зокрема, для таких гібридів як LG 5478 та ES Rosalia. Адаже для останніх у випадку ізоляції достовірно знижувалося загальна кількість сім'янок – в середньому на 12,3 % та 10,6 % відповідно. Загалом для більшості гібридів, незважаючи на відсутність статистично значущої відмінності, простежується тенденція щодо вищих значень саме у групі рослин з вільним доступом комах-запилювачів, що свідчить про їх сприятливий вплив на даний параметр (рис. 1А; подано медіанні значення, оскільки медіана є мірою, що краще відображає тенденції розмаху даних вибірки).

Цікавим є той факт, що у одних гібридів, незалежно від типу запилення, вказаний параметр може змінюватися у широких межах (рис. 1А), натомість в інших – зберігати відносну стабільність даних (наприклад, у гібриду ES Bella в групі ізольованих рослин мінімальні значення становили 721 шт., а максимальні зростали до 2469 шт., тобто відмінність між цими двома значеннями склала 3,4 рази; натомість у гібриду MAS 81.К також в групі ізольованих рослин мінімум зафіксований на рівні 1409 шт., а максимум – 1965 шт., тобто відмінність між розмахами значень склала 1,4 рази).

Середня маса сім'янок кошика у досліджених гібридів варіювала в широкому діапазоні: від $49,9 \pm 9,7$ г до $96,9 \pm 20,3$ г (табл. 1, рис. 1В). Найвищі значення зафіксовані у групі рослин з вільним доступом комах-запилювачів, а саме у гібриду ES Rosalia, натомість найменші вагові характеристики встановлені для рослин з ізоляцією комах-запилювачів, а саме у гібриду LG 5478. Як і у випадку із загальною кількістю сім'янок у кошику, так і для загальної маси сім'янок кошика простежується тенденція щодо кращого прояву даної ознаки за наявності комах-запилювачів, зокрема для таких гібридів як LG 5478, ES Rosalia та MAS 81.К, адже в групі ізольованих рослин (в порівнянні з групою рослин з вільним доступом комах-запилювачів) відзначається достовірне зниження значень (в середньому на 45,4 %, 12,8 % та 11,3 % відповідно). Відмітимо, що у гібриду ES Bella, незалежно від типу запилення, відзначається відносно найширший розмах показників, натомість у гібриду MAS 81.К – відносно найвужчий.

Маса 1000 штук належить до найважливіших показників якості сім'янок соняшника, оскільки свідчить про їх виповненість і відображає сортову ознаку [28]. Аналізуючи показник маси 1000 штук, встановлено, що дана ознака є досить варіабельною (табл. 1, рис. 1С), адже у рослин, культивованих у досліджуваних ґрунтово-кліматичних умовах, змінювалася в межах від $32,0 \pm 0,8$ г до $57,4 \pm 1,6$ г, тобто відмінності між даними значеннями склали ~2 рази. Втім в межах одного гібриду не прослідковується такого розмаху між показниками. Найкращі ж результати у вирощуваних умовах зареєстровані у групі рослин з вільним доступом комах-запилювачів для гібриду ES Rosalia, а відносно найнижчі – в групі ізольованих рослин гібриду LG 5478. Зазначимо, що як і у випадку з попередніми параметрами, маса 1000 штук також зберігає тенденцію щодо кращого прояву даної ознаки за наявності комах-запилювачів, адже у випадку ізоляції кошиків значення знижувалися до 37 %. Проте статистично значимих відмінностей не підтверджено для жодного з досліджуваних гібридів (тому говоримо про тенденцію). Про мінливість розміру цієї ознаки згадується й іншими науковцями [28], які зазначають, що маса 1000 сім'янок знаходиться під впливом генетичних та екологічних факторів і варіює між різними видами рослин, сортами й гібридами та умовами вирощування. Мінливість розміру цієї ознаки характерна як для різних генотипів в одній місцевості, так і для одного генотипу в різних місцевостях [25].

Оскільки даний параметр відноситься до ознак сорту і гібриду та є генетично детермінованим [28], то виробниками зазначаються потенційні величини, які прогнозовано можна очікувати. Так, при співставленні отриманих нами значень із потенційними показниками, заявленими виробниками, лише у двох гібридів (SY Kupava, ES Rosalia), зокрема у групі рослин із вільним досту-

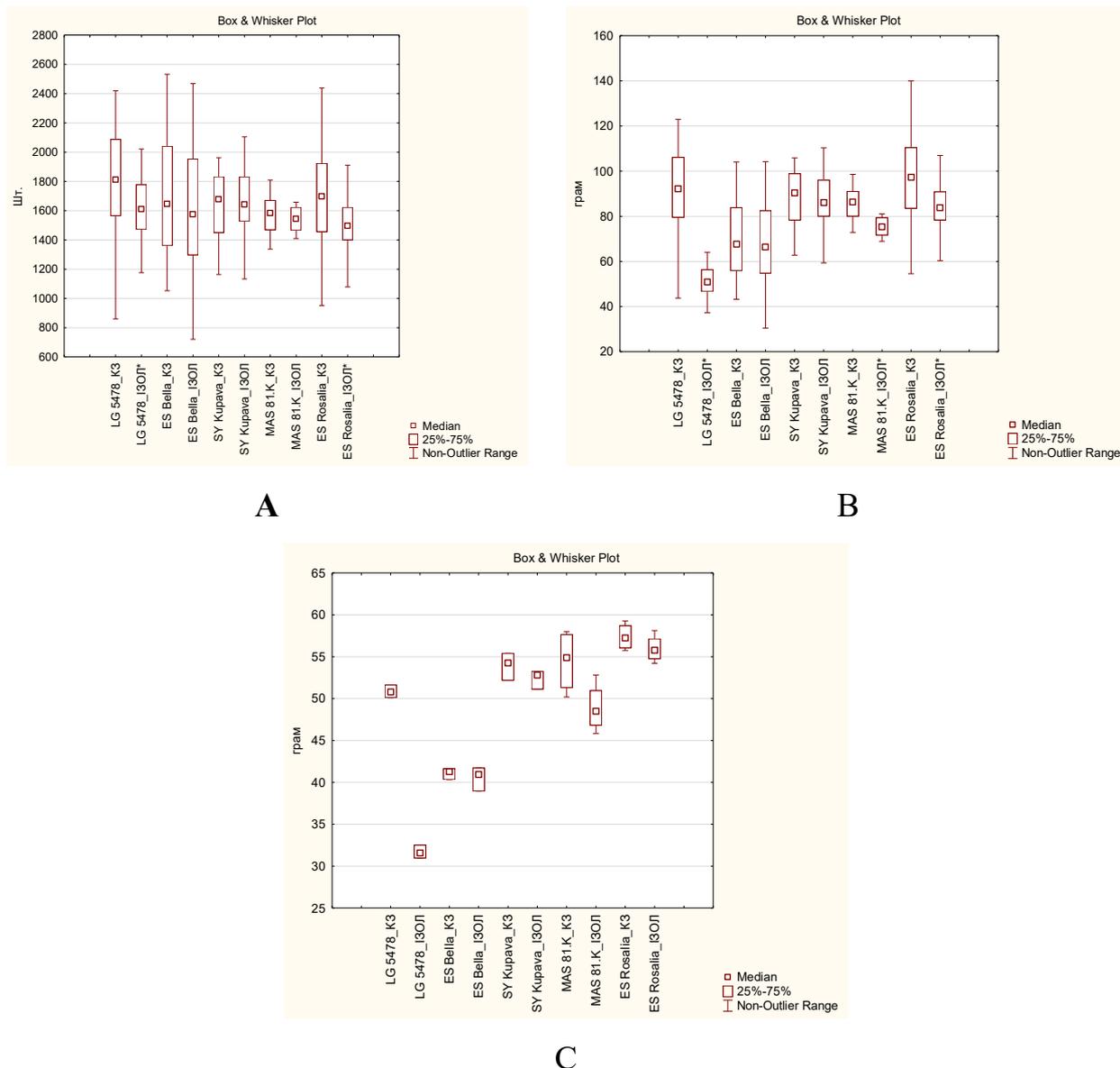


Рис. 1. Показники продуктивності досліджуваних лінолевих самофертильних гібридів *Helianthus annuus L.* за різних умов запилення (А – загальна кількість сім'янок у кошику, шт.; В – загальна маса сім'янок з кошика, г; С – маса 1000 штук, г; КЗ – комахозапильні рослини; ІЗОЛ – ізовані рослини)

* біля цифр в нижній шкалі – статистично достовірна відмінність між дослідною та контрольною групами рослин, встановлена за критерієм Вілкоксона ($p < 0,05$)

пом комах-запилювачів, дані наблизилися до очікуваних результатів (рис. 2).

Відомо, що показники продуктивності суттєво впливають на потенціал урожайності *H. annuus*. Тому в подальшому нами проведено розрахунок біологічної урожайності досліджуваних гібридів. І встановлено, що значення останньої варіювали в межах від 24,97 ц/га до 48,43 ц/га (табл. 2). Найкращою ж урожайністю у досліджуваних ґрунтово-кліматичних умовах відзначилися рослини гібриду ES Rosalia, зокрема, за вільного доступу комах-запилювачів. Проте, у всіх групах незалежно від гібриду чи типу запилення відзначено недобір урожаю, зокрема

більш суттєво у випадку відсутності комах-запилювачів: у групі рослин з вільним доступом комах-запилювачів – в середньому до ~30 %, у групі ізованих рослин – в середньому до ~50 %. Останнє можна представити в наступному рейтинговому ряді (у порядку спадання; перше значення для групи рослин з вільним доступом комах-запилювачів, друге – для групи ізованих рослин): ES Rosalia (-3,1 %; -15,5 %) → MAS 81.K (-5,4 %; -14,2 %) → SY Kupava (-20,0 %; -21,4 %) → ES Bella (-30,4 %; -31,7 %) → LG 5478 (-8,6 %; -50,1 %). Звідси випливає, що найбільш «чутливим» до відсутності комах-запилювачів є соняшник гібриду LG 5478. Загалом, для усіх

Таблиця 1

Показники продуктивності гібридів *Helianthus annuus* L. за різних умов запилення

Гібрид	Група рослин	Загальна кількість сім'янок у кошику, шт.	Загальна маса сім'янок з кошика, г	Маса 1000 штук, г
LG 5478	вільне комахозапилення	$1797,3 \pm 424,6$ 861,0...2419,0	$91,4 \pm 21,6$ 43,8...123,0	$50,8 \pm 0,8$ 50,1...51,6
	ізолювані	$1575,6 \pm 304,4^*$ 849,0...2022,0	$49,9 \pm 9,7^*$ 26,9...64,1	$32,0 \pm 0,8$ 31,0...32,5
ES Rosalia	вільне комахозапилення	$1688,0 \pm 352,9$ 951,0...2439,0	$96,9 \pm 20,3$ 54,6...139,9	$57,4 \pm 1,6$ 55,8...59,3
	ізолювані	$1509,8 \pm 282,8^*$ 944,0...2032,0	$84,5 \pm 15,8^*$ 52,8...113,7	$56,0 \pm 1,7$ 54,2...58,1
ES Bella	вільне комахозапилення	$1693,7 \pm 407,8$ 1053,0...2533,0	$69,6 \pm 16,8$ 43,3...104,1	$41,1 \pm 0,7$ 40,3...41,6
	ізолювані	$1620,7 \pm 494,6$ 721,0...2469,0	$68,3 \pm 21,0$ 30,4...104,2	$40,6 \pm 1,4$ 39,0...41,7
SY Курава	вільне комахозапилення	$1630,2 \pm 238,7$ 1164,0...1962,0	$88,0 \pm 12,9$ 62,8...105,9	$54,0 \pm 1,6$ 52,2...55,4
	ізолювані	$1650,6 \pm 238,3$ 1133,0...2105,0	$86,5 \pm 12,5$ 59,4...110,3	$52,4 \pm 1,1$ 51,1...53,3
MAS 81.K	вільне комахозапилення	$1561,7 \pm 190,8$ 1024,0...1809,0	$85,1 \pm 10,4$ 55,8...98,6	$54,5 \pm 3,8$ 50,2...58,0
	ізолювані	$1579,9 \pm 162,4$ 1409,0...1965,0	$75,5 \pm 7,9^*$ 68,9...96,1	$48,9 \pm 2,9$ 45,8...52,8

Примітка: у чисельнику – середнє значення та стандартне відхилення; у знаменнику перше значення – мінімальний показник, друге – максимальний; * – статистично достовірна відмінність між групами рослин з вільним доступом комах-запилювачів та групами ізолюваних рослин, встановлену за критерієм Вілкоксона ($p < 0,05$)

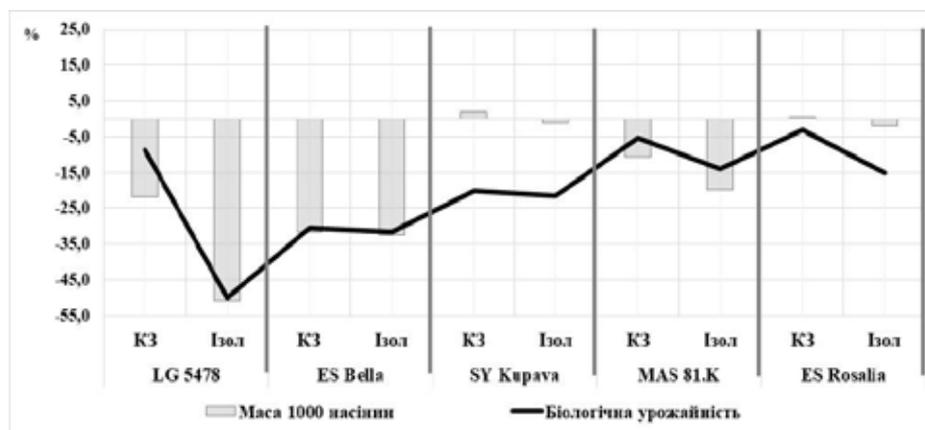


Рис. 2. Відсоток зміни показників маси 1000 шт. та біологічної урожайності гібридів *H. annuus* за різних умов запилення в порівнянні із потенційною урожайністю

Таблиця 2

Урожайність досліджуваних гібридів *H. annuus* за різних умов запилення, ц/га

Група рослин	LG 5478	ES Bella	SY Курава	MAS 81.K	ES Rosalia
Вільний доступ комах-запилювачів	45,69	34,80	43,99	42,55	48,43
Ізолювані	24,97	34,15	43,25	38,63	42,24
Потенційна урожайність	50	50	55	45	50

досліджуваних гібридів *H. annuus* спостерігається тенденція позитивного впливу комахоzapилення на біологічну урожайність соняшника.

Відмітимо, що у більшості випадків за умов ізоляції (в порівнянні з вільним доступом комах-запилювачів) спостерігалось зниження показників: загальної кількості сім'янок – в середньому на 4,3-12,3 %; загальної маси сім'янок – в середньому на 1,7-45,4 %; маси 1000 шт. – в середньому на 1,2-37,0 %; біологічної урожайності – в середньому на 1,7-45,3 % (рис. 3). При цьому, до відсутності комах-запилювачів найбільш чутливим виявився показник загальної маси сім'янок у кошику, а відносно менш чутливим – загальна кількість сім'янок, тобто перша зі згаданих ознак може слугувати індикатором щодо відсутності комахоzapилення.

Отримані нами дані цілком узгоджуються із подібного роду дослідженнями інших вітчизняних та зарубіжних науковців щодо сприятливого впливу комахоzapилення на продуктивність та урожайність *H. annuus*, навіть для самофертильних ліній соняшнику. Так, Padhy D. з колегами повідомляють, що бджолоzapилення сприяє збільшенню загальної кількості сім'янок на ~4-11 %, маси 1000 штук – на ~13-18 %, і урожайності в цілому – на ~33 % [27]. У праці Зароченцевої О. зі співавторами, вказується, що за умов бджолоzapилення показник маси 1000 сім'янок зростає на ~20-30 %, а урожайність – на ~9-32 % [8]. Андрієнко О. з колегами також довели, що показники урожайності комахоzapильних рослин в порівнянні з ізольованими значно зростають (в середньому на ~41 %) [1]. У дослідженнях Amarilla L. з колегами доведено, що ізоляція доступу агентів-запилювачів до квітів самофертильних гібридів соняшнику зменшувала зав'язування сім'янок на ~20 %, а загальну масу сім'янок у кошику – на ~12 %. Крім того, автори встановили позитивну кореляцію зав'язу-

вання сім'янок, маси сім'янок, вмісту олії (в тому числі олеїнової кислоти) та урожайності зі збільшенням кількості відвідувань медоносними бджолами та дикими запилювачами [16].

У окремих дослідженнях, як і в у нашому експерименті, для деяких гібридів *H. annuus* не підтверджено сприятливого впливу комахоzapилення, або ж, навпаки, відмічено зворотній ефект. Так, науковці пояснюють це тим, що дані явища певною мірою пов'язані з варіаціями в частоті відвідування бджолами та ступені самофертильності [24], або ж тестовані гібриди мали частково високу самосумісність [17, 19].

Отже, досліджені нами самофертильні лінолеві гібриди *H. annuus* по-різному реагували на ізоляцію комахоzapилення, хоча загалом спостерігається загальна тенденція до поліпшення досліджуваних ознак за умови вільного доступу комах-запилювачів. Очевидно, що більшість розглянутих параметрів визначаються генетичними особливостями та залежать від низки інших чинників (кліматичних умов, систем удобрення, технології вирощування тощо). Втім, враховуючи збереження нами в даному експерименті однотипності умов біотопу, все ж таки виявлено достовірність сприятливого впливу комахоzapилення на покращення продуктивності та урожайності деяких гібридів *H. annuus*.

Висновки. Таким чином, на основі дослідження окремих характеристик продуктивності та біологічної урожайності сучасних самофертильних гібридів *Helianthus annuus* L., культивованих на полях агрохолдингу «Контінентал Фармерз Груп», що у адміністративних межах с. Хоростків Тернопільської області (Україна), доведено позитивний вплив комахоzapилення (зокрема, у 3-х з 5-ти досліджуваних гібридів за більшістю досліджуваних параметрів у групі рослин із вільним доступом комах-запилювачів). Так, за умов ізоляції кошиків зафіксовано тен-

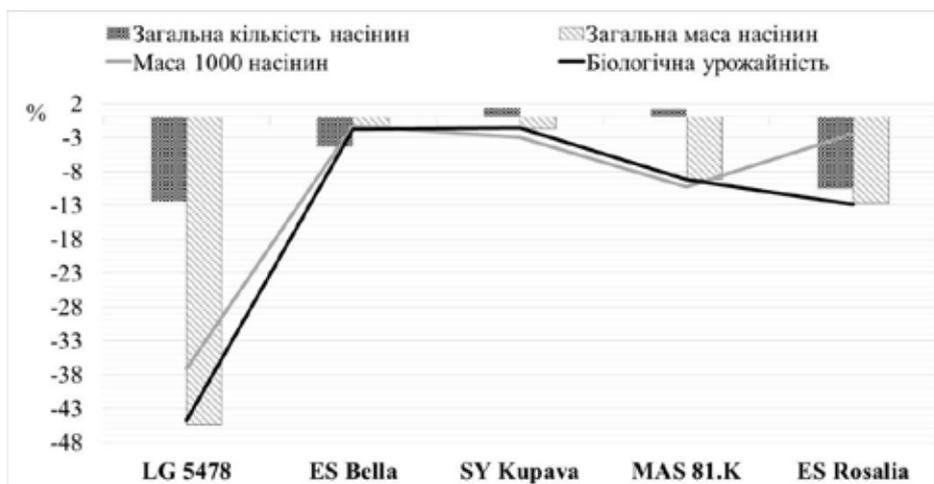


Рис. 3. Відсоток зміни показників продуктивності та біологічної урожайності досліджуваних гібридів *H. annuus* за умов ізоляції комахоzapилення

денції до зниження: загальної кількості сім'янок (в середньому на 4,3–12,3 %), загальної маси сім'янок (в середньому на 1,7–45,4 %), маси 1000 штук (в середньому на 1,2–37,0 %), що в сукупності обумовило зменшення біологічної урожайності (в середньому на 1,7–45,3 %). При цьому, найбільш «чутливим» до відсутності комах-запилювачів виявився показник загальної маси сім'янок, а з-поміж гібридів – LG 5478. Грунтуючись на отриманих результатах, ми рекомендуємо у даних (або подібних) ґрунтово-кліматичних умовах з урахуванням комахозапилення культивувати соняшник гібриду ES Rosalia, оскільки

рослини найкраще себе проявили за більшістю досліджених параметрів.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати досліджень, а також рекомендації щодо культивування найбільш толерантних генотипів у відповідних ґрунтово-кліматичних умовах, можуть стати у пригоді для аграріїв, зокрема, при плануванні вирощування масивів окремих самофертильних гібридів *H. annuus* із урахуванням індивідуальних потреб у присутності комах-запилювачів для отримання високих показників продуктивності та урожайності в цілому.

Література

1. Андрієнко О. О., Андрієнко А. Л., Жука О. О. Причини невивірності насіння та кошика соняшнику. *Пропозиція*. 2016. № 3. С. 60–68.
2. Герасимюк П., Зароченцева О., Лакуста О. Вплив комах-запилювачів на урожайність гібридів *Helianthus annuus* L. в умовах передгір'я. *Соціоекосистеми в умовах війни та інших викликів: тези Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернівці, 3-4 вересня 2025 р.)*. Чернівці: 2025. С. 166–172.
3. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови / Нац. стандарт України. Київ : Держстандарт України, 1994. 54 с.
4. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості / Нац. стандарт України. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 173 с.
5. ДСТУ 4694:2006. Соняшник. Олійна сировина. Технічні умови / Нац. стандарт України. Київ : Держспоживстандарт України, 2007. 12 с.
6. ДСТУ 7011:2009. Соняшник. Технічні умови / Нац. стандарт України. Київ : Держспоживстандарт України, 2010. 13 с.
7. Зароченцева О., Жук А., Федоряк М., Черлінка Л., Твердохліб М., Герасимюк П., Черлінка В. Вплив комахозапилення на вихід та олійність насіння гібридів *Helianthus annuus* L. *Biological systems*. 2022a. № 14 (1). С. 62–71. <https://doi.org/10.31861/biosystems2022.01.062>
8. Зароченцева О., Черлінка Л., Жук А., Черлінка В., Герасимюк П., Федоряк М. Вплив комахозапилення на насінневі характеристики та врожайність гібридів соняшнику. *Бджільництво України*. 2022b. № 1 (9). С. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.46913/beekeepingjournal.2022.9.06>
9. Кулинич І. М., Соловійова Т. М. Вплив бджолозапилення на насінневу продуктивність соняшнику. *Бджільництво України*. 2021. № 1 (6). С. 44–48. <https://doi.org/10.46913/beekeepingjournal.2021.6.07>
10. Мащенко Ю., Лобуренко М. Продуктивність гібридів соняшнику іноземної селекції в північному степу України. *Сучасні технології агропромислового виробництва: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції*. Кропивницький: ЦНТУ, 2024. С. 233–235.
11. Національний атлас України / голов. ред. Л. Г. Руденко; голова ред. кол. Б. Є. Патон; НАН України, Інститут географії, Державна служба геодезії, картографії та кадастру. К.: ДНВП «Картографія», 2007. 435 с.
12. Пелех Л. В., Онуфрійчук О. М. Особливості густоти стояння рослин соняшнику. *Аграрні інновації*. 2025. № 29. С. 107–112. <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.29.18>
13. Сало Л., Данілова А. Урожайність соняшника залежно від бджолозапилення в степу України. *Сучасні технології агропромислового виробництва: матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. Кропивницький: ЦНТУ, 2022. С. 130–133.*
14. Федоряк М., Жук А., Зароченцева О., Филипчук Т., Ситнікова І., Легета У., Москалик Г., Герасимюк П., Сосновський К., Шпак Я. Алгоритм дослідження продуктивності гібридів соняшника за умов комахозапилення. *Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія. Біологічні системи*. 2023. № 15 (1). С. 52–63. DOI: <https://doi.org/10.31861/biosystems2023.01.052>
15. Abbasi K. H., Jamal M., Ahmad S., Ghramh H. A., Khanum S., Khan K. A., Ullah M. A., Aljedani D. M., Zulficar B. Standardization of managed honey bee (*Apis mellifera*) hives for pollination of Sunflower (*Helianthus annuus*) crop. *Journal of King Saud University-Science*. (2021). Vol. 33 (8). P. 101608. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101608>
16. Amarilla L. D., Grilli G., Huais P. Y., Labuckas D., Maestri D., Ferrarese M., Tourn E., Szawarski N., Grandinetti G., Ferreira M. F., Torres C., Vesprini J. L., Maggi M., Galetto L. Pollinators significantly enhance seed set, yields and chemical parameters of oil seed in sunflower crops. *Field Crops Research*. 2025. Vol. 322. 109736. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109736>
17. Astiz V., Iriarte L., Flemmer A., Hernandez, L. Self-compatibility in modern hybrids of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Fruit set in open and self-pollinated (bag isolated) plants grown in two different locations. *Helia*. 2011. Vol. 34 (54). P. 129–138. <https://doi.org/10.2298/hel1154129a>
18. Bartual A. M., Bocci G., Marini S., Moonen A. C. Local and landscape factors affect sunflower pollination in a Mediterranean agroecosystem. *PLoS one*. 2018. Vol. 13 (9). e0203990. DOI: 10.1371/journal.pone.0203990
19. Brewer G. J., Miwa K., Hanford K. Measuring bee effects on seed traits of hybrid sunflower. *Plants*. 2023. Vol. 12 (14). P. 2662. <https://doi.org/10.3390/plants12142662>
20. Herasymyuk P., Zarochentseva O., Zhuk A., Leheta U., Fylypchuk T., Sytnikova I., Fedoriak M. The impact of insect pollination on seed and yield characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L.) linoleic hybrids in the Carpathian foothill zone of Ukraine. *International Journal of Ecosystems & Ecology Sciences*. 2025. Vol. 15 (4). P. 131–140. <https://doi.org/10.31407/ijees>

21. Hussain S., Khalili A., Qayyum A., Khan S. U., Mehmood A., Ahmad G., Ghazy A.-H., Al-Doss A., Attia A., Zeng Y. Optimizing sunflower (*Helianthus annuus* L.) hybrids growth, achene and oil yield through soil applied Sulphur and Zinc. *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15 (1). P. 13829. DOI: 10.1038/s41598-025-96800-2
22. Kendarini N., Herwati A., Novansyah R. A., Ardiarini N. R. Determining the relationship between yield and yield components in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Agriprecision & Social Impact*. 2025. Vol. 2 (1). P. 140–152. DOI: <https://doi.org/10.62793/japsi.v2i1.51>
23. Laaraj S., Hussain A., Shahid E., Bakhtawar F., Zia M., Najam A., Zulfiqar N., Sweilam S., Ed-Dra A., Elfazazi K. Nutritional, pharmaceutical, and health benefits of sunflower seeds (*Helianthus annuus* L.): a comprehensive review of food applications. *Food and Humanity*. 2025. Vol. 5. 100641. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2025.100641>
24. Mallinger R., Prasifka J. Benefits of insect pollination to confection sunflowers differ across plant genotypes. *Crop Science*. 2017. Vol. 57. P. 3264–3272. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.03.0148>
25. Marinković R., Škorić D., Nenadić N., Jovanović D., Miklič V., Joksimović J., Stanojević D., Nedeljković S. Uticaj položaja semena u glavi na prinosa i neke komponente prinosa semena kod suncokreta (*Helianthus annuus* L.). *Zbornik radova Instituta za ratarstvo i povrtarstvo*. 1994. Vol. 22. P. 379–389.
26. Mmbando G. S., Massawe D. P. Sunflower (*Helianthus annuus* L.): a potential genetic resource for breeding crops with combined stress-resistance in semi-arid environments. *Discover Biotechnology*. 2025. Vol. 2 (1). P. 26.
27. Padhy D., Satapathy C. R., Borkataki S., Shankar T., Ray S., Yadav M. K., Kalasare S., Hosamani G., Ramalakshmi V. Pollinators diversity and pollination effects on yield attributes of sunflower (*Helianthus annuus* Linnaeus) in Odisha, India. *Entomon*. 2024. Vol. 49 (1). P. 103–108. DOI: 10.33307/entomon.v49i1.1043
28. Radić V., Mrđa J., Jocković M., Čanak P., Dimitrijević A., Jocić, S. Sunflower 1000-seed weight as affected by year and genotype. *Ratarstvo i povrtarstvo / Field and Vegetable Crops Research*. 2013. Vol. 50 (1). P. 1–7. doi:10.5937/ratpov50-3214.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ҐРУНТІВ ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЙ

Єгорова О.В.¹, Чиж О.В.², Волочай П.А.¹

¹Черкаський державний технологічний університет
бул. Шевченко, 460, 18006, м. Черкаси

²Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України
вул. Садово-Ботанічна, 1, 01014, м. Київ
ok.yehorova@chdту.edu.ua, olyachyzh037@gmail.com

У роботі проведено оцінку рівня техногенного навантаження на ґрунтове середовище в зоні впливу залізничного транспорту на території села Березняки Черкаського району. Дослідження ґрунтів включало визначення фізико-хімічних властивостей (гранулометричного складу, кислотності, вмісту гумусу та рухомих форм фосфору) та вмісту важких металів (Cu, Zn, Pb, Cd). Встановлено закономірне зниження вмісту гумусу та рухомих форм фосфору на ділянках, розташованих на відстані 50-150 м від залізничної колії, що вказує на деградацію верхнього шару ґрунтів унаслідок інтенсивного техногенного навантаження. Поряд із цим виявлено тенденцію до лужної реакції ґрунтового середовища поблизу залізниці (рН до 8,7), що може бути спричинено акумуляцією карбонатів та хімічними викидами, пов'язаними з експлуатацією залізничної інфраструктури. Вміст важких металів у ґрунтах переважно перевищував фонові рівні, що підтверджено розрахунками коефіцієнтів концентрації (K_c), сумарного індексу забруднення (Z_c) та індексу антропогенного навантаження (PLI). Особливо високі концентрації зафіксовано на відстані 200-300 м від колії, де сумарний індекс забруднення (Z_c) досягав 11,55, а індекс антропогенного навантаження (PLI) – 3,49, що свідчить про високий рівень техногенної трансформації ґрунтового покриву. Основними забруднювачами виступають цинк і свинець, коефіцієнти концентрації яких місцями перевищують фонові значення у 5-7 разів. Загальний характер змін свідчить про зниження агроекологічної якості ґрунтів, зростання екотоксикологічного ризику та зменшення екосистемної стійкості на дослідженій території. Результати дослідження є підґрунтям для подальшого екологічного моніторингу територій, прилеглих до залізничної інфраструктури, та обґрунтування заходів із зниження техногенного навантаження, включаючи рекультивацію деградованих земель. *Ключові слова:* екологічна безпека, залізничний транспорт, важкі метали, моніторинг.

Environmental impact assessment of railway transport on the soil condition in adjacent areas. Yehorova O., Chyzh O., Volochai P.

The study assesses the level of technogenic load on the soil environment in the area influenced by railway transport within the territory of Berезnyaky village, Cherkasy district. The soil research included the determination of physicochemical properties (particle-size distribution, acidity, humus content, and available phosphorus forms) as well as the concentration of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd). A consistent decrease in humus content and available phosphorus was observed in areas located 50-150 meters from the railway tracks, indicating degradation of the topsoil layer as a result of intense anthropogenic impact. In addition, a trend toward alkaline soil reaction was detected near the railway (pH up to 8,7), which may be caused by the accumulation of carbonates and chemical emissions related to railway infrastructure operation. Heavy metal content in soils mostly exceeded background levels, as confirmed by calculations of concentration coefficients (K_c), total pollution index (Z_c), and the pollution load index (PLI). Particularly high concentrations were recorded at a distance of 200-300 meters from the tracks, where the total pollution index (Z_c) reached 11,55 and the pollution load index (PLI) was 3.49, indicating a high level of technogenic transformation of the soil cover. The main pollutants are zinc and lead, whose concentration coefficients in some cases exceeded background values by 5 to 7 times. The overall pattern of changes indicates a decline in the agroecological quality of soils, an increase in ecotoxicological risk, and a reduction in ecosystem resilience in the studied area. The research results provide a foundation for further environmental monitoring of areas adjacent to railway infrastructure and for substantiating measures to reduce technogenic load, including the reclamation of degraded lands. *Key words:* environmental safety, railway transport, heavy metals, monitoring.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного техногенного розвитку залізничний транспорт виступає потужним і стабільним джерелом комплексного антропогенного впливу на довкілля. Його функціонування супроводжується систематичним надходженням у навколишнє середовище забруднюючих речовин, серед яких найпоширенішими є нафта та нафтопродукти, іони важких металів, оксиди азоту, сірки, вуглецю та леткі орга-

нічні сполуки [1, 2]. Рівень екологічного навантаження може коливатися в межах від допустимого до кризового, залежно від інтенсивності експлуатації інфраструктури та її технічного стану. Основними напрямками впливу залізничного транспорту є трансформація природного ландшафту, забруднення повітря, ґрунтів, шумове та вібраційне навантаження, а також порушення структури природних екосистем [3]. Дослідження цих процесів є надзвичайно акту-

альними в контексті забезпечення екологічної безпеки та розробки ефективних заходів з мінімізації негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.

Актуальність дослідження. Залізничний транспорт виступає одним із ключових джерел комплексного техногенного навантаження на компоненти довкілля, зокрема ґрунтово-геохімічні системи. У процесі експлуатації залізничної інфраструктури у навколишнє середовище надходить широкий спектр ксенобіотиків і токсичних речовин антропогенного походження. До найбільш поширених та екологічно небезпечних належать синтетичні поверхнево-активні речовини, вуглеводневі сполуки (включаючи нафтопродукти), феноли, сполуки важких металів та інші полутанти.

Встановлено, що найбільша концентрація забруднювальних речовин фіксується безпосередньо вздовж залізничного полотна, де систематичне накопичення токсичних сполук у ґрунтах зумовлене тривалим впливом руху поїздів, вібраційних навантажень, витоків паливно-мастильних матеріалів та атмосферного осідання шкідливих компонентів, що зумовлює деградацію ґрунтового покриву, втрату його фітоекоекологічної функції та погіршення загального стану екосистем [4].

Окрім хімічного навантаження, залізнична інфраструктура спричиняє значний вплив на рослинний покрив. Трансформація ландшафту природної екосистеми зумовлює скорочення видового різноманіття, зниження екологічної стійкості природних угруповань, а в умовах надмірного забруднення – повної деградації фітоценозів [5, 6].

Попри переважно негативний екологічний вплив залізничного транспорту на ґрунти прилеглих територій, інфраструктура залізниць може мати й несподівано позитивні функції у збереженні біорізноманіття. Залізничні насипи, завдяки своїй ізольованості, специфічному мікроклімату та низькому рівню антропогенного втручання, іноді слугують своєрідними рефугіумами – місцями збереження рідкісних та зникаючих видів. Прикладом є астрагал шерстистоквітковий (*Astragalus dasyanthus* Pall.), занесений до Червоної книги України. Цей степовий вид зберіг свої локальні популяції саме на залізничних насипах, які частково імітують природні степові екотопи, значною мірою знищені через розорювання та урбанізацію. Оцінюючи екологічний стан ґрунтів у зоні впливу залізниць, доцільно враховувати не лише рівень техногенного забруднення, а й потенціал цих територій як осередків збереження рідкісної флори.

Таким чином, вивчення просторового розподілу та рівнів забруднення ґрунтів у зонах впливу залізничного транспорту є надзвичайно актуальним, з огляду на необхідність обґрунтування природоохоронних заходів, спрямованих на мінімізацію антропогенного навантаження та збереження екологічної рівноваги в зонах транспортної інфраструктури.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Забруднення ґрунтів, повітря та рослинності у зонах залізничних колій призводить до порушення екологічної рівноваги та погіршення якості природних ресурсів, що має безпосередній негативний вплив на біорізноманіття і здоров'я населення.

На міжнародному рівні зростає увага до екологічних аспектів транспортної інфраструктури, зокрема залізничних шляхів. Європейський Союз у своїй Ґрунтовій стратегії до 2030 року наголошує на необхідності контролю забруднення ґрунтів та їх відновлення, що включає моніторинг екологічного стану територій, прилеглих до транспортних коридорів. Зокрема, рішення Ради ЄС від 17 червня 2024 року передбачає впровадження системи обов'язкового моніторингу здоров'я ґрунтів із акцентом на виявлення забруднених ділянок і розробку заходів з урахуванням соціально-економічних та екологічних чинників.

Крім того, діяльність міжнародних організацій, таких як ВООЗ, ЮНЕП та Європейська агенція з навколишнього середовища, спрямована на розробку комплексних стратегій захисту навколишнього середовища, що включають оцінку та зниження негативного впливу транспортних систем. Ці ініціативи є важливим фундаментом для формування екологічної політики на національному та регіональному рівнях.

Отже, проведене дослідження впливу залізничного транспорту на ґрунтові ресурси та прилеглих екосистем має велике значення для наукового розуміння проблеми та практичного забезпечення сталого розвитку транспортної інфраструктури з урахуванням екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика екологічного впливу залізничного транспорту є одним із важливих напрямків сучасних наукових досліджень. Значну увагу цьому питанню приділяли такі вчені, як Босак П.В., Калимбет М.В., Данченко Ю.М., Бобрик Н.Ю. та інші [7-9]. У їхніх роботах розглядаються основні екологічні виклики, пов'язані з експлуатацією залізничної інфраструктури, включно з забрудненням ґрунтів, повітря та водних ресурсів, а також зміною рослинного покриву вздовж колій. Окремо висвітлюються питання методів моніторингу та оцінки екологічного стану прилеглих територій, природоохоронних заходів та управління екологічною безпекою залізничного транспорту. Наукові здобутки у цій галузі є основою для розробки ефективних стратегій мінімізації негативного антропогенного впливу, а також впровадження сталих технологій і практик в залізничній галузі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У численних наукових дослідженнях встановлено високий рівень техногенного

забруднення ґрунтів та інших компонентів довкілля на територіях промислових міст [10-12]. Водночас екологічний стан ґрунтового покриву в безпосередній близькості до залізничних колій залишається недостатньо вивченим, особливо на приміських і сільських територіях. Ранішні дослідження продемонстрували високий рівень накопичення важких металів та інших забруднювачів у біоіндикаторах, зокрема у дикорослих рослинах, зібраних поблизу залізничних колій у різних регіонах [12-15]. Таким чином, метою даної роботи є комплексна оцінка впливу залізничного транспорту на якісний та елементний склад ґрунтів прилеглих територій, а також аналіз просторового розподілу забруднювачів у зонах безпосереднього контакту з транспортними коліями.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні особливостей формування антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив у безпосередній зоні впливу залізничних колій, зокрема у контексті акумуляції важких металів та токсичних сполук, а також у виявленні факторів, що зумовлюють інтенсивність цих процесів. Результати можуть слугувати науковим підґрунтям для розробки дієвих природоохоронних заходів та систем моніторингу екологічного стану територій, прилеглих до транспортної інфраструктури.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Отримана у ході досліджень інформація може слугувати орієнтиром при організації ґрунтово-екологічного моніторингу міських територій, для науково обґрунтованої оцінки геоекологічного стану урбоґрунтів і прийнятті оптимальних управлінських рішень галузі охорони навколишнього середовища.

Викладення основного матеріалу. Залізничний транспорт є одним із потужних чинників техногенного впливу на екосистеми, розташовані в безпосередній близькості до магістралей. Його експлуатація супроводжується систематичним надходженням до ґрунтового середовища токсичних речовин, зокрема важких металів та органічних сполук, що спричиняє порушення функціональних властивостей педосфери. Такий вплив зумовлює поступове зниження природної родючості ґрунтів і, за умов тривалого антропогенного навантаження, може призводити до їх деградації та втрати екосистемної стійкості.

Дослідження проводили на території с. Березняки Черкаського району Черкаської області, що розташоване у центральній частині України. У фізико-географічному відношенні досліджувана територія належить до Придніпровської височини в межах Правобережного Лісостепу. Клімат регіону – помірно континентальний із відносно теплим літом та м'якою зимою. Основним типом ґрунтового покриву є сірі лісові та чорноземні ґрунти різного ступеня опідзолення, які характеризуються середнім і високим рівнем родючості. Поблизу населеного пункту проходить залізнична гілка, що зумовлює потенційний

техногенний вплив на компоненти довкілля, зокрема на ґрунтове середовище.

З метою оцінки елементного складу ґрунтів у зоні впливу залізничного транспорту на території с. Березняки Черкаського району було обрано вісім ділянок відбору зразків. Відбір ґрунтових зразків здійснювався на різних відстанях від залізничної колії (50-500 м) з фіксованим інтервалом у 50 м, таким чином, було закладено 7 точок відбору. Такий підхід дозволив проаналізувати градієнт змін показників залежно від віддаленості джерела забруднення. Найдальша точка (500 м) розглядалася як фоновий орієнтир.

Відбір проб ґрунту здійснювали методом «конверта» у межах квадрату 1×1 м; глибина відбору становила 0-20 см, що відповідає зоні найбільшого техногенного навантаження на педосферу. Для досліджуваних зразків ґрунтів було визначено основні фізико-хімічні властивості. Вміст загального гумусу визначали методом Тюріна в модифікації ЦІНАО за ДСТУ 4289:2003. Визначення гранулометричного складу ґрунтів проводили у відповідності до ДСТУ ISO 11277:2011. Визначення кислотності ґрунту – рН_{вод.} – за ДСТУ 8346:2015. Відібрані зразки аналізували за вмістом валових форм важких металів методом атомно-абсорбційної спектроскопії на атомному спектрометрі.

Ступінь техногенного навантаження на ґрунтовий покрив та можливість міграційного переходу до рослин визначали шляхом розрахунку основних геохімічних та екологічних показників, зокрема коефіцієнту концентрації (K_c). Даний показник характеризує ступінь накопичення важких металів у компонентах урбосистеми відносно фонового зразка та є показником активності радіальної міграції елемента:

$$K_c = \frac{C_i}{C_f}, \quad (1)$$

де C_i – концентрація i -го елемента в компонентах урбосистеми, що досліджується, C_f – фоновий вміст [14].

Оскільки антропогенне забруднення ґрунту є багатокомпонентним, коефіцієнт концентрації (K_c) не є достатньо інформативним і тому необхідні додаткові відомості про токсичну дію окремих металів та їх багатовалентних комбінацій на рослини. Тому санітарно-гігієнічну оцінку стану ґрунту проводили за сумарним показником забруднення – (Z_c), який є кумулятивною сумою вмісту елементів над їх фоновими рівнями та характеризує ефект впливу асоціації металів [14]:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n-1). \quad (2)$$

Розрахунок показника накопичення забруднення (PLI – pollution load index), який демонструє, у скільки разів концентрація важких металів у ґрунті перевищує фонову проводили за формулою [14]:

$$PLI = \sqrt[n]{K_{C_1} \cdot K_{C_2} \cdot \dots \cdot K_{C_n}}, \quad (3)$$

де K_c – це співвідношення вмісту металу в зразку до фонового вмісту,

n – кількість металів.

Значення $PLI > 1$ вказує, що поверхневі відклади забруднені, $PLI < 1$ свідчить про відсутність забруднення [15].

За результатами гранулометричного аналізу ґрунтів, відібраних поблизу залізниці, встановлено значну різноманітність їхнього механічного складу (рисунок 1). Основну групу становлять різні типи суглинків (зразки 1-6), які поєднують у собі середній вміст піску, мулу та глини, що забезпечує помірну водопроникність і високу здатність акумулювати забруднювальні речовини. Окремо виділяються піщані ґрунти (зразок 7) та супіщаний (фон, зразок 8), для яких характерна висока проникність та низька ємність поглинання, що створює умови для швидкого міграційного перенесення забруднювачів у глибші горизонти. Таким чином, ґрунтовий покрив дослідженої території представлений переважно суглинками, що сприяє акумуляції важких металів та нафтопродуктів, а на ділянках із пісками і супіщаними ґрунтами існує ризик інтенсивнішого поширення забруднень у навколишнє середовище.

Аналіз вмісту гумусу в ґрунтах призалізничної зони засвідчив виражену варіабельність його показників залежно від відстані до залізничної колії (рисунок 2). Максимальне значення (4,4%) зафіксовано у зразку 8, відібраному на відстані 500 м, що слугувала фоновією ділянкою. Це вказує на високий рівень органічної речовини та відносно добру родючість ґрунту за межами безпосереднього техногенного впливу.

Підвищені концентрації гумусу також відзначено у зразках, відібраних на відстані 250 м (3,4%) та 350 м (3,5%), що відповідає середньому рівню

забезпеченості органічною речовиною. Помірні значення (2,3-2,8%) характерні для зразків, відібраних на відстані 150 м (2,8%), 200 м (2,3%) та 300 м (2,8%). Найнижчі показники виявлено у зразках на відстані 100 м (1,4%) та 50 м (0,9%), що свідчить про зниження гумусного стану ґрунтів у безпосередній близькості до залізничної колії.

У цілому спостерігається нерівномірність просторового розподілу органічної речовини, яка може бути наслідком як природних ґрунтоутворних процесів (різна гранулометрична будова, водно-повітряний режим), так і техногенного навантаження. Зокрема, на якість ґрунту можуть впливати забруднення нафтопродуктами, важкими металами, механічне ущільнення верхнього горизонту тощо. Наявність ділянок із підвищеним вмістом гумусу може вказувати на локальні умови акумуляції органічних сполук, тоді як низькі значення – на деградаційні процеси, спричинені антропогенним впливом. Таким чином, результати дослідження підтверджують мозаїчний характер гумусового стану ґрунтів поблизу залізничної інфраструктури, що необхідно враховувати під час екологічного моніторингу та планування заходів із рекультиватії порушених територій.

Визначення кислотності ґрунтів у призалізничній зоні показало коливання значень рН у межах від 6,2 до 8,7, що свідчить про різний характер реакції ґрунтового середовища (рисунок 3).

Найбільш кислу реакцію (рН = 6,2) виявлено у зразку, відібраному на відстані 200 м (зразок 4), тоді як найбільш нейтральне значення зафіксовано на 350 м (зразок 7, рН = 6,9). Це може вказувати на локальні особливості ґрунтоутворних процесів або специфічний техногенний вплив на певних ділянках. У більшості зразків, особливо на ближчих відстанях до залізничної колії (50 м – зразок 1, 100 м – зразок 2, 150 м – зразок 3, 250 м – зразок 5), спостерігається

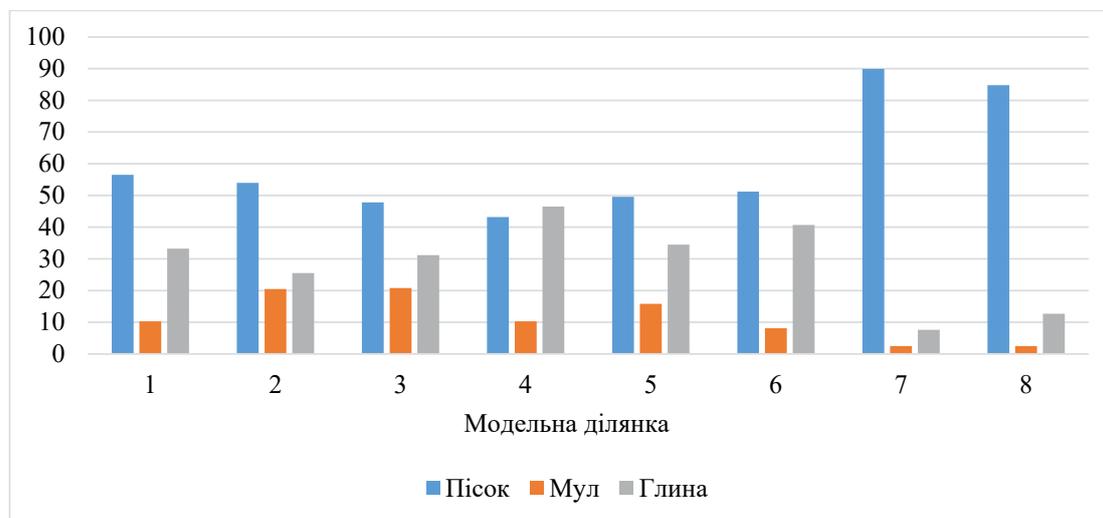


Рис. 1. Гранулометричний склад ґрунтів поблизу залізниці

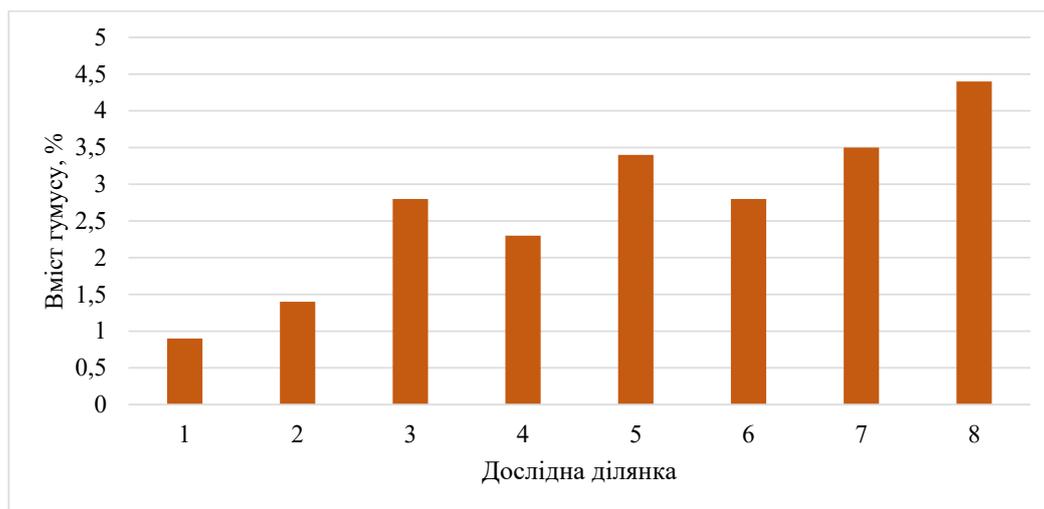


Рис. 2. Вміст гумусу у ґрунтах призалізничної зони

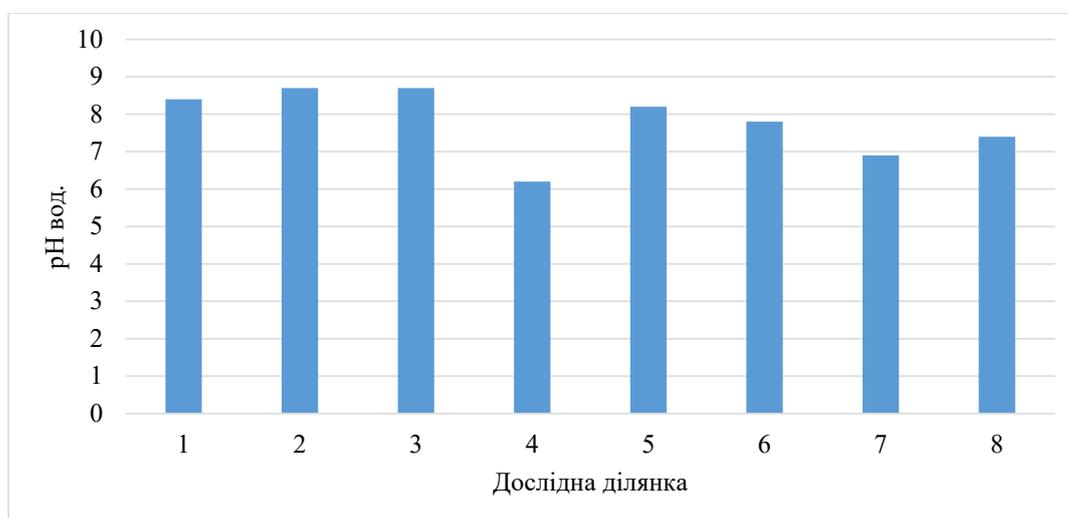


Рис. 3. Значення рН водної витяжки у ґрунтових зразках досліджуваної території

виражена лужна реакція: рН коливається в межах 8,2-8,7. У зразках, відібраних на відстані 300 м (зразок 6) та 500 м (зразок 8 – фонові ділянки), реакція ґрунту є помірно лужною – рН становить відповідно 7,4 та 7,8. Отримані результати свідчать, що досліджені ґрунти загалом мають тенденцію до лужності, що може бути пов'язано з акумуляцією карбонатів, впливом техногенного навантаження та особливостями ґрунтоутворних процесів у межах досліджуваної території. Така реакція середовища є важливим фактором, оскільки визначає доступність поживних елементів для рослин і здатність ґрунтів акумулювати або мігрувати важкі метали.

У ході дослідження було проведено визначення вмісту рухомих форм фосфору (у перерахунку на P_2O_5) (рисунок 4). Отримані результати демонструють значну варіабельність концентрацій P_2O_5 у межах досліджуваної території. Зокрема, мінімальні значення фосфатів були зафіксовані у зразках,

відібраних на відстані 50 та 100 м (9,5 та 9,1 мг/кг відповідно), що може свідчити про зниження біодоступності фосфору в зонах із підвищеним техногенним навантаженням або про деградацію ґрунту внаслідок тривалого антропогенного впливу.

Натомість найвища концентрація P_2O_5 (548 мг/кг) була виявлена на відстані 200 м, що значно перевищує типовий агрохімічний фон і вказує на потенційне локальне накопичення фосфорних сполук. Інші зразки демонструють коливання вмісту фосфатів у межах від 18,8 до 204 мг/кг, без чітко вираженої тенденції до зменшення або зростання залежно від віддаленості від залізниці. Така нерівномірність розподілу може бути обумовлена як природними чинниками – типом ґрунту, гідрологічними умовами та особливостями мікрорельєфу, – так і локальними джерелами техногенного забруднення, зокрема через витоки мастил, добрив або інших фосфоровмісних речовин, пов'язаних з обслуговуванням залізничної

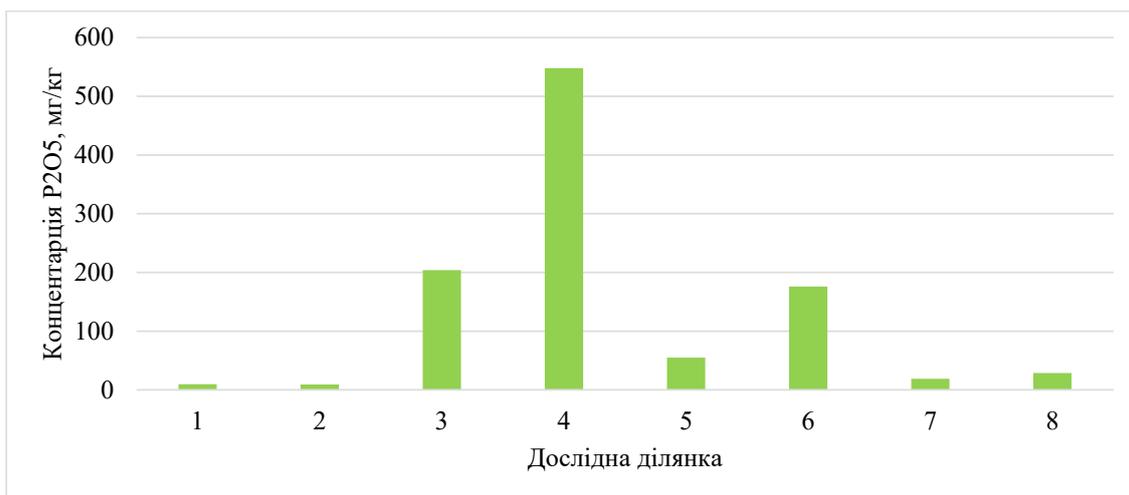


Рис. 4. Розподіл рухомих форм фосфору в ґрунтовому покриві, мг/кг

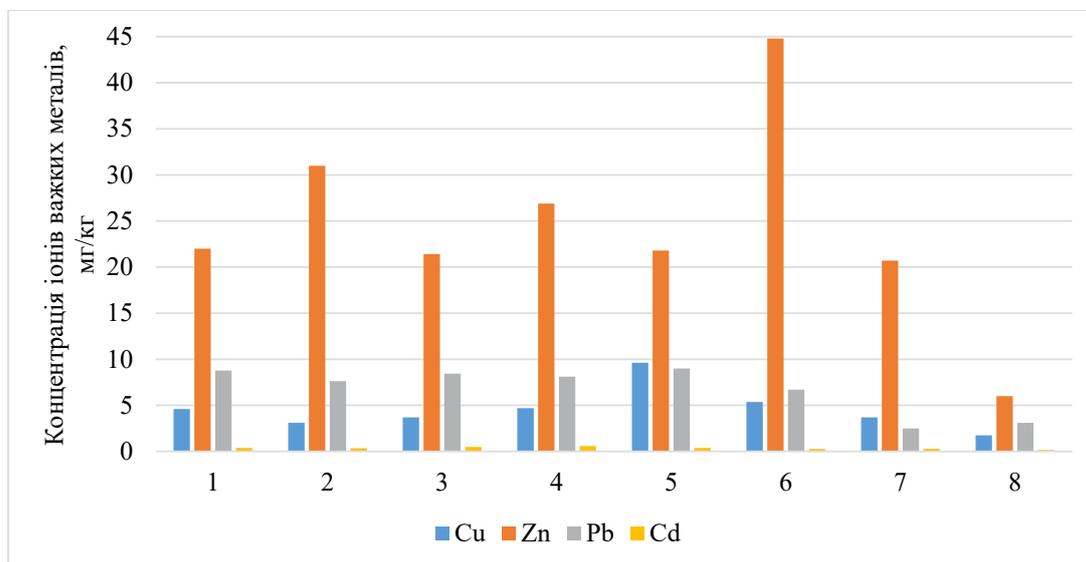


Рис. 5. Концентрації основних важких металів у зразках ґрунту, мг/кг

інфраструктури. Зазначені результати свідчать про складний характер впливу залізниці на агрохімічний стан прилеглих ґрунтів, що потребує подальших досліджень для виявлення джерел та механізмів такого забруднення.

Ґрунти, відібрані поблизу залізничної колії, показали значне накопичення важких металів, що свідчить про високий рівень техногенного забруднення (рисунк 5). Залізнична інфраструктура, зокрема рухомий склад та колійне господарство, є джерелом викидів міді, цинку, свинцю та кадмію, які надходять у навколишнє середовище в результаті зношення металевих деталей, а також викидів паливно-мастильних матеріалів.

У досліджених зразках концентрація міді варіювалася від 3,1 до 9,62 мг/кг, що у кілька разів перевищує середній фон у ґрунтоутворних породах України (20 мг/кг), вказуючи на значне антропогенне наван-

таження. Вміст цинку, для якого середній фон становить близько 50 мг/кг, коливався у межах 6-44,8 мг/кг, іноді перевищуючи природні значення, що також є ознакою техногенного впливу. Свинець виявлений у концентраціях від 2,5 до 9 мг/кг, що суттєво перевищує фон, що характерно для зон із активним транспортним навантаженням. Кадмій, хоч і присутній у низьких концентраціях (0,15-0,57 мг/кг), має високу міграційну активність і токсичність, а його максимальні значення наближаються до гранично допустимих рівнів для ґрунтів України.

Для оцінки ступеня забруднення були розраховані коефіцієнти концентрації (K_c), сумарний індекс забруднення (Z_c) та індекс антропогенного навантаження (PLI) (таблиця 1).

У більшості зразків спостерігається перевищення фонових значень за вмістом міді (Cu), цинку (Zn), свинцю (Pb) та кадмію (Cd), що свідчить про вплив

Таблиця 1

Оцінка рівня забруднення ґрунтів важкими металами у межах призалізничної території

№	Cu		Zn		Pb		Cd		Сумарний показник забруднення Z_c	Індекс антропогенного навантаження PLI
	C, мг/кг	K_c								
1	4,6	2.63	22,0	3.67	8,77	2.83	0,38	2.53	8,66	2,87
2	3,1	1.77	31,0	5.17	7,63	2.46	0,35	2.33	8,73	2,76
3	3,7	2.11	21,4	3.57	8,44	2.72	0,49	3.27	8,67	2,97
4	4,7	2.69	26,9	4.48	8,1	2.61	0,57	3.80	10,58	3,36
5	9,62	5.49	21,8	3.63	9,0	2.90	0,38	2.53	11,55	3,49
6	5,37	3.07	44,8	7.47	6,7	2.16	0,26	1.73	11,43	3,33
7	3,70	2.11	20,7	3.45	2,5	0.81	0,28	1.87	5,24	1,98
Ф	1,75	-	6,0	-	3,1	-	0,15	-	-	-

техногенного навантаження на якість ґрунтового покриву.

Найвищий рівень забруднення встановлено у зразку, відібраному на відстані 250 м (зразок 5), де сумарний показник забруднення Z_c становив 11,55, а індекс антропогенного навантаження (PLI) – 3,49. Значно підвищені значення цих показників також зафіксовано на 200 м (зразок 4: $Z_c = 10,58$; $PLI = 3,36$) та 300 м (зразок 6: $Z_c = 11,43$; $PLI = 3,33$), що вказує на наявність зони максимальної акумуляції забруднюючих речовин у центральній частині дослідженого профілю. Основний внесок у формування загального рівня забруднення в цих зразках забезпечують цинк та свинець, коефіцієнти концентрації яких (K_c) подекуди перевищують в 5-7 разів.

На відстанях 50-150 м (зразки 1, 2, 3) рівень забруднення залишається помірно високим (Z_c у межах 8,6-8,7; PLI 2,76-2,97), що свідчить про стабільний, але менш інтенсивний техногенний вплив у безпосередній близькості до колії, можливо, через розсіювання джерел забруднення або природні умови самоочищення ґрунтів.

Найнижчі показники сумарного забруднення ($Z_c = 5,24$) та індексу PLI (1,98) спостерігаються на відстані 350 м (зразок 7), що вказує на поступове зниження впливу техногенних чинників із віддаленням від джерела забруднення. Цей зразок є єдиним, де значення K_c свинцю (0,81) не перевищує одиниці, тобто відповідає фоновому рівню.

У цілому результати дослідження підтверджують наявність просторово мозаїчного забруднення ґрунтів призалізничної території. Сумарний індекс забруднення Z_c свідчив про помірний і сильний рівень забруднення, а індекс PLI у всіх випадках перевищував одиницю, підтверджуючи наявність техногенного впливу. Отримані дані підкреслюють необхідність постійного моніторингу та впровадження заходів щодо зменшення антропогенного

навантаження на ґрунти в районах залізничної інфраструктури, оскільки накопичення важких металів, особливо кадмію та міді, може негативно впливати на екосистеми та здоров'я людини.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено, що ґрунти поблизу залізниці характеризуються значною різноманітністю гранулометричного складу з переважанням суглинків, які сприяють накопиченню забруднюючих речовин, зокрема важких металів та нафтопродуктів. Піщані та супіщані ділянки, навпаки, мають підвищену проникність, що створює умови для інтенсивнішої міграції забруднень у глибші горизонти. Вміст гумусу у досліджених ґрунтах має суттєву просторову варіабельність, що відображає поєднання природних ґрунтоутворних процесів та вплив техногенного навантаження. Підвищений рівень гумусу у деяких зразках свідчить про локальні умови акумуляції органічних речовин, тоді як низькі показники пов'язані з деградаційними процесами під впливом антропогенного фактору. Концентрації важких металів (Cu, Zn, Pb, Cd) у ґрунтах значно перевищують значення фонових рівнів, що свідчить про суттєве техногенне забруднення, пов'язане із залізничною інфраструктурою. Особливо відзначається накопичення міді та кадмію, які мають високу токсичність та потенціал міграції. Розраховані індекси забруднення (K_c , Z_c , PLI) підтверджують наявність помірного та сильного забруднення у досліджуваних ґрунтах. Отримані дані підкреслюють необхідність регулярного моніторингу якості ґрунтів у зонах впливу залізничного транспорту та впровадження заходів щодо зниження техногенного навантаження. Особливо важливо контролювати накопичення токсичних важких металів, які можуть мати довготривалі негативні наслідки для екосистем та здоров'я людини.

Література

1. Bosak P., Lukuanchuk N., Popovych V. Factors influencing railway transport on environmental safety. *Ecological Sciences*. 2022. Т. 42, № 3. С. 205–210. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.34>
2. Хатнюк Ю. А. Поняття та суть екологічної безпеки у діяльності залізничного транспорту України. *Вісник Чернівецького факультету Національного університету «Одеська юридична академія»*. 2015. № 1. С. 210-218. URL: <http://dspace.lvduvs.edu.ua/handle/1234567890/2945>
3. Пилипчук О. Я., Висоцька Т. І., Пічкур, Т. В. Вплив залізничного транспорту на навколишнє середовище: проблеми очищення ґрунту від нафтопродуктів. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2020. № 3 (30). 113-118. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.19>
4. Plakhotnik V. N., Onyshchenko J. V., Yaryshkina L. A. The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2005. Т. 10, № 3. С. 263–268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2005.02.001>
5. Polishchuk A., Antonyak H. Influence of transport load on the elemental composition of soil in the suburban area of the city of Lviv. *Ecological Sciences*. 2021. Т. 38, № 5. С. 81–86. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.5-38.14>
6. Vaiškūnaitė R., Jasiūnienė V. The analysis of heavy metal pollutants emitted by railway transport. *Transport*. 2020. Т. 35, № 2. С. 213–223. URL: <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12751>
7. Danchenko Y., Bosak P., Shukel I., & Popovych V. (2023). Railway infrastructure of Ukraine as a factor of soil chemical hazard (analytical overview). // *12th International Conference “Environmental Engineering” (ICEE 2023), 11–12 May 2023, Vilnius, Lithuania*. URL: <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.873>
8. Калимбет М. В., Зеленько Ю. В. Концепції щодо впровадження екологічно чистих та ресурсозберігаючих технологій експлуатації залізничного транспорту. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 79-ї Міжнародної науково-практ. конф. (Дніпро, 16-17 травня 2019 р.) / Дніпров. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро : Вид-во Дніпров. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. С. 299–301.
9. Bobryk N. Поширення та акумуляція важких металів у ґрунтах призалізничних територій. *Biosystems Diversity*. 2015. Т. 23, № 2. URL: <https://doi.org/10.15421/011526>
10. Yehorova O., Zhytska L., Bakharev V., Mislyuk O., Khomenko O. Assessing the deposition of heavy metals in edaphotopes and synantrophy vegetation under the conditions of technological pollution of the city. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. V. 1. № 10 (127). P. 15-26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297718>.
11. Antonyak H., Mamchur Z., Polishchuk A., Lesiv M., Hoivanovych N. Chapter 5. Environmental impact of road transport. In: *Sustainable Development and Human Health*. Edited by Andrzej Krynski, Georges Kamtoh Tebug, Svitlana Voloshanska. Czestochowa: Publishing House of Polonia University “Educator”, 2020. – P. 61–74. DOI: <https://dx.doi.org/10.23856/W1706>
12. Quantitative source tracking of heavy metals contained in urban road deposited sediments / N. Hong et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. P. 122362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122362>
13. Wang Z., Zhang J., Watanabe I. Source Apportionment and Risk Assessment of Soil Heavy Metals due to Railroad Activity Using a Positive Matrix Factorization Approach. *Sustainability*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 75. URL: <https://doi.org/10.3390/su15010075>
14. Гололобова О. Оцінка поліелементного забруднення ґрунтів територій різного рівня антропогенного навантаження. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2011. № 1-2. Режим доступу: <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/Gololob.pdf>
15. Яковичина, Т.Ф. Індекс антропогенного навантаження на ґрунт урбоєкосистем внаслідок забруднення важкими металами. Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Форум гірників – 2016», 5–8 жовтня 2016 р., Дніпро, 2, 224–229. Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/149875/1/224-229.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 13.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 504.06

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.15>

ІНВЕНТАРИЗАЦІЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Пічкур Т.В.

Навчально-науковий інститут залізничного транспорту
Національного транспортного університету
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1, 01010, м. Київ
pt1993@ukr.net

Розглядається проблема інвентаризації викидів забруднюючих речовин в атмосферу, що утворюються внаслідок діяльності підприємств залізничного транспорту. Актуальність дослідження зумовлена зростанням техногенного навантаження на довкілля з боку транспортної галузі, зокрема залізничного транспорту, який є одним із джерел антропогенного забруднення атмосфери. Результати проведеної інвентаризації свідчать, що обсяги та склад забруднюючих речовин, які викидаються підприємствами залізничного транспорту, не відповідають вимогам чинного екологічного законодавства та нормативам охорони атмосферного повітря. Зокрема, транспортні засоби з двигунами внутрішнього згоряння та дизельні енергетичні установки є джерелами значних викидів окисів сірки, нітрогену, вуглецю, сажі та дрібнодисперсних часток, що формують небезпечне аерозольне забруднення. У сучасній стратегії розвитку транспортної галузі питання викидів парникових газів розглядається переважно у контексті скорочення їх обсягів. Однак слід розмежовувати викиди парникових газів і забруднюючих речовин, адже, попри спільність джерел, їхні екологічні наслідки суттєво відрізняються. Викиди парникових газів сприяють підвищенню концентрації вуглекислого газу в атмосфері, накопиченню тепла та формують кліматичні зміни, що проявляються у збільшенні частоти хвиль тепла, посух, надмірних опадів, підвищенні рівня Світового океану та підтопленні прибережних територій. Натомість викиди забруднюючих речовин безпосередньо впливають на стан здоров'я населення та біоти. Вони спричиняють загострення серцево-судинних і респіраторних захворювань, підвищують рівень передчасної смертності. Сучасні епідеміологічні дослідження підтверджують, що мешканці урбанізованих територій із високим рівнем забруднення повітря мають більшу схильність до тяжкого перебігу вірусних інфекцій, зокрема COVID-19, і демонструють підвищену летальність. За даними Світового банку, на транспортний сектор України припадає близько 40 % загального обсягу викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Вже у 2002 році рівень забруднення повітря перевищував національні стандарти якості повітря в найбільш населених і промислово розвинених регіонах країни. Незважаючи на те, що нормативи якості атмосферного повітря в Україні формально є суворішими, ніж Рекомендації ВООЗ щодо якості повітря для Європи, фактичний стан атмосферного середовища у більшості великих міст залишається незадовільним і перевищує допустимі межі. *Ключові слова:* інвентаризація шкідливих викидів, залізничний транспорт, забруднюючі речовини, геохімічний склад забруднених речовин, техніка.

Inventory of pollutant emissions into the atmosphere at railway transport enterprises. Pichkur T.

The problem of inventorying emissions of pollutants into the atmosphere resulting from the activities of railway transport enterprises is considered. The relevance of the study is due to the growth of man-made environmental pollution from the transport industry, in particular railway transport, which is one of the sources of anthropogenic atmospheric pollution. The results of the inventory show that the volumes and composition of pollutants emitted by railway transport enterprises do not meet the requirements of current environmental legislation and air protection standards. In particular, vehicles with internal combustion engines and diesel power plants are sources of significant emissions of sulfur oxides, nitrogen, carbon, soot and fine particles, which form dangerous aerosol pollution. In modern transport development strategies, the issue of greenhouse gas emissions is considered mainly in the context of reducing their volumes. However, it is necessary to distinguish between greenhouse gas emissions and pollutants, because, despite the common sources, their environmental consequences are significantly different. Greenhouse gas emissions contribute to an increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere, heat accumulation and form climate changes, which are manifested in an increase in the frequency of heat waves, droughts, excessive precipitation, a rise in the level of the World Ocean and flooding of coastal areas. Instead, pollutant emissions directly affect the health of the population and biota. They cause exacerbation of cardiovascular and respiratory diseases, increase the level of premature mortality. Modern epidemiological studies confirm that residents of urban areas with high levels of air pollution are more prone to more severe viral infections, including COVID-19, and demonstrate increased mortality. According to the World Bank, the transport sector in Ukraine accounts for about 40% of total air pollution emissions. As early as 2002, air pollution levels exceeded national air quality standards in the most populated and industrialized regions of the country. Despite the fact that air quality standards in Ukraine are formally stricter than the WHO Air Quality Guidelines for Europe, the actual state of the air environment in most large cities remains unsatisfactory and exceeds permissible limits. *Key words:* inventory of harmful emissions, railway transport, pollutants, geochemical composition of pollutants, equipment.

Постановка проблеми. Розв'язання екологічних проблем, пов'язаних із забрудненням атмосферного повітря, та проведення сучасного стратегічного оцінювання рівня екологічної небезпеки, зумовленої

діяльністю підприємств залізничного транспорту, набувають особливої актуальності в умовах сталого розвитку України. Підприємства залізничного транспорту є значними джерелами антропогенного

впливу на довкілля, зокрема на атмосферне середовище, внаслідок викидів забруднюючих речовин у процесі експлуатації рухомого складу, роботи дизельних двигунів та допоміжного енергетичного обладнання.

Викиди забруднюючих речовин спричиняють суттєвий вплив на регіональні зміни атмосферного режиму, структуру повітряних мас і геохімічний склад приземних шарів атмосфери. Накопичення шкідливих компонентів, таких як окиси сірки, нітрогену, вуглецю, сажи та дрібнодисперсних часток, призводить до погіршення якості повітря, формування вторинних забруднень і зростання ризику для здоров'я населення. З огляду на це виникає необхідність удосконалення методів інвентаризації викидів, екологічного моніторингу та розроблення системних підходів до оцінювання і мінімізації впливу транспортно-комплексу на атмосферне середовище.

Актуальність дослідження. Проблема забруднення атмосферного повітря внаслідок діяльності підприємств залізничного транспорту набуває особливої ваги в контексті зростання техногенного навантаження на довкілля. Аналіз показників викидів забруднюючих речовин свідчить, що сучасний рівень технологій очищення атмосфери не забезпечує досягнення нормативної якості повітря у промислово розвинених регіонах. Тому проведення комплексної інвентаризації викидів забруднюючих речовин на підприємствах залізничного транспорту є актуальним науковим завданням. Воно має важливе практичне значення для вдосконалення системи екологічного моніторингу, розроблення ефективних заходів зниження техногенного навантаження та забезпечення реалізації державної політики у сфері охорони атмосферного повітря.

Зв'язок дослідження з важливими науковими і практичними завданнями. Досліджувана проблема безпосередньо пов'язана з вирішенням актуальних наукових і практичних завдань у сфері охорони навколишнього природного середовища, зокрема з удосконаленням системи екологічного моніторингу та управління якістю атмосферного повітря на підприємствах залізничного транспорту. Проблематика має міждисциплінарний характер, оскільки поєднує еколого-хімічні, еколого-геологічні та еколого-правові аспекти врегулювання питань, що виникають унаслідок техногенного впливу залізничного транспорту. Таким чином, дослідження спрямоване на забезпечення науково обґрунтованого підходу до зниження рівня забруднення атмосфери та мінімізації негативного впливу техногенезу на довкілля і здоров'я людини.

Виклад основного матеріалу. Атмосферне повітря є одним із ключових елементів біосфери, від якого безпосередньо залежить існування та здоров'я людини. Забезпечення його чистоти та екологічної безпеки є необхідною умовою сталого розвитку суспільства. У сучасних умовах зростання техно-

генного навантаження особливого значення набуває охорона повітря, що реалізується через систему регламентації та контролю за викидами забруднюючих речовин, які утворюються в результаті антропогенної діяльності підприємств. Нормативно-правові засади охорони атмосферного повітря визначені чинним природоохоронним законодавством України, зокрема Законом України «Про охорону навколишнього природного середовища» [1], Законом України «Про охорону атмосферного повітря» [2] та іншими підзаконними актами. Ці документи регламентують принципи, механізми та економічні інструменти забезпечення екологічної безпеки, включаючи встановлення нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) і розмірів плати за забруднення довкілля різними видами речовин.

Одним із ключових практичних завдань у сфері охорони атмосферного повітря є визначення якісного та кількісного складу забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферу в процесі виробничої діяльності підприємств. Це завдання реалізується шляхом проведення інвентаризації викидів забруднюючих речовин, яка є невід'ємним елементом екологічного моніторингу та управління природоохоронною діяльністю підприємств залізничного транспорту.

Метою проведення інвентаризації є набуття дослідниками практичних навичок у виконанні аналітичних визначень параметрів викидів, опанування методики їх розрахунку та оформлення звітно-виконавчої документації. У процесі виконання інвентаризації здійснюється вивчення нормативно-правових та нормативно-технічних документів, що регламентують порядок проведення таких робіт, визначають методи розрахунку, форми облікових звітів та вимоги до їх оформлення.

У випадках, коли проведення натурних вимірювань або безпосереднього обстеження об'єкта є ускладненим, дослідники користуються довідковими та статистичними даними щодо обсягів виробництва, характеристик технологічних процесів та джерел утворення забруднюючих речовин. Ці відомості використовуються як вихідна база для розрахунків валових (т/рік) та максимально разових (г/с) викидів.

Зміст практичної частини дослідження полягає у виконанні послідовних етапів: опису загальної характеристики підприємства, аналізу технологічних процесів, систематизації вихідних даних, проведенні розрахунків та узагальнення отриманих результатів у вигляді таблиць, графічних матеріалів, схем і пояснювального тексту. Отримані результати створюють основу для розроблення заходів щодо зниження рівня забруднення атмосферного повітря та підвищення екологічної ефективності діяльності підприємств залізничного транспорту.

Інвентаризація викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря – це комплексна система робіт,

спрямована на ідентифікацію, облік і аналіз організованих та неорганізованих джерел забруднення на підприємствах. Її метою є формування достовірної бази даних щодо просторового розміщення джерел викидів на території підприємства, а також оцінювання технічного стану вентиляційних мереж і газоочисного обладнання, що забезпечують мінімізацію впливу шкідливих речовин на атмосферу.

Проведення інвентаризації викидів є обов'язковим елементом системи екологічного менеджменту підприємства та складовою частиною програм із охорони навколишнього природного середовища. У процесі інвентаризації уточнюються параметри джерел забруднення, номенклатура та кількісні показники викидів, визначається клас небезпеки речовин і уточнюються характеристики потоків забрудненого повітря. Проект інвентаризації узгоджується виключно з адміністрацією підприємства, яке є об'єктом дослідження.

Необхідність проведення інвентаризації стосується усіх суб'єктів господарювання, що експлуатують стаціонарні джерела викидів забруднюючих речовин. Підсумковий звіт з інвентаризації, затверджений керівником підприємства, є офіційним документом, який підтверджує кількісно-якісні показники викидів. Цей документ слугує основою для розроблення нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ), формування екологічної звітності, обчислення економічних збитків за забруднення довкілля та забезпечення державного контролю у сфері охорони атмосферного повітря.

Державне статистичне спостереження за викидами забруднюючих речовин і парникових газів від пересувних джерел (автотранспорту, залізничного, повітряного, водного та спеціального рухомого складу) має на меті отримання достовірної, репрезентативної та зіставної статистичної інформації про рівень антропогенного навантаження на атмосферу. Ці дані використовуються як для формування національної системи екологічного моніторингу, так і для виконання міжнародних зобов'язань України в межах Конвенції про трансграничне забруднення повітря на великі відстані [3], Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі [4] та Рамкової конвенції ООН про зміну клімату [5].

Головним завданням цього виду державного обліку є визначення за встановленими методиками обсягів викидів забруднюючих речовин і парникових газів від експлуатації пересувних джерел, що перебувають у власності юридичних і фізичних осіб. До них належать автомобільний, залізничний, авіаційний, морський, річковий транспорт, а також промислова, сільськогосподарська, будівельна та інша техніка.

Протягом 1999–2006 рр. розрахунки викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від транспортного сектору здійснювалися за трьома окремими методиками: по-перший – «Методика роз-

рахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферу від автотранспорту, що перебуває у приватній власності населення» [6], по-другий – «Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферу автотранспортом, який використовується суб'єктами господарської діяльності та іншими юридичними особами всіх форм власності» [7], і по-третій – «Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферу від авіаційного, водного та залізничного транспорту» [8]. Основу цих підходів становили статистичні дані щодо споживання палива двигунами внутрішнього згоряння автотранспорту юридичних і фізичних осіб, залізничного, водного та авіаційного транспорту, а також питомі викиди хімічних речовин (окиси карбону – CO, окиси нітрогену – NO_x, вуглеводні, діоксид сірки – SO₂, леткі органічні сполуки – ЛОС, сажа) на одиницю використаного палива (наприклад, 1 т палива).

У 2017 р. було внесені суттєві зміни та доповнення до вказаних методик. Зокрема, розроблено новий порядок розрахунку, який передбачає охоплення статистичним обліком не лише транспортних джерел, а й діяльності виробничої, сільськогосподарської, будівельної та іншої техніки. У національному кадастрі антропогенних викидів зазначається, що для підкатегорії «транспорт» (включно з внутрішнім рухомим складом усіх секторів) у 2017 р. застосовувалися методики відповідно до класів Tier 2 (для CO₂ з бензину, дизеля, LPG) та Tier 1 (для неуглецевих газів) відповідно до Каталогу парникових газів України 1990–2023 [9].

Сучасні дані свідчать, що сектор транспорту України відповідає приблизно за 11 % загальних викидів парникових газів станом на останні роки згідно з Climate Action Tracker+1 (незалежний науковий проєкт, який відстежує кліматичні дії урядів і оцінює їх відповідність цілям Паризької угоди щодо обмеження глобального потепління до 1,5 °C або значно нижче 2 °C [10]. Показник прямого CO₂-викиду транспортного сектору в 2019 р. оцінювався на рівні близько 27 млн т CO₂/рік, при цьому в сценаріях для досягнення цілі 1,5 °C для 2030 р. прогнозується обсяг у межах 13–14 млн т CO₂/рік [11]. Крім того, відповідно до дослідження 2022 р., в Україні обсяги викидів від виробничих джерел (вуглецеве паливо) знижувалися внаслідок спаду виробництва та споживання палива [12].

Таким чином, удосконалення методології 2017 р. дозволило:

- розширити охоплення джерел (не лише дороги, а й внутрішній транспорт, техніка інших секторів);
- гармонізувати національні підходи до міжнародних стандартів (Tier методики, використання оновлених факторів викиду) – наприклад, використовувати базові дані викидів «CoM Default Emission Factors for the Eastern Partner countries – Version 2017» [13];

• підвищити точність оцінок викидів завдяки застосуванню актуалізованих даних про структуру палива, види транспортних засобів, типи техніки.

Водночас слід зазначити, що попри оновлення методик, певна частина джерел і даних досі характеризується значною невизначеністю: у національній звітності наведено, що для категорії 1.А.3 «Транспорт» невизначеність даних про активність складає ~9,6 %, а факторів викиду – до ~10,9 % для NO_x.

Удосконалення національних методик розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря здійснювалося з урахуванням вимог і принципів європейської програми CORINAIR (COordination d'INformation AIR) [14]. Ці зміни стосувались як розширення переліку контрольованих хімічних речовин (зокрема, включення парникових газів – CO₂, CH₄, N₂O), так і розширення спектра джерел обліку за рахунок виробничої, сільськогосподарської, будівельної та спеціалізованої техніки, що перебуває в власності юридичних і фізичних осіб.

Сучасні методики враховують можливість використання додаткових, більш надійних статистичних джерел інформації щодо споживання різних видів палива транспортними засобами населення, що підвищує точність оцінки антропогенних викидів.

Згідно з удосконаленими розрахунками передбачається визначення обсягів надходження до атмосфери основних забруднюючих речовин та парникових газів, серед яких: оксид вуглецю (CO), аміак (NH₃), метан (CH₄), оксиди азоту (NO_x), сажа (C), діоксид сірки (SO₂), свинець (Pb), діоксид вуглецю (CO₂), неметанові леткі органічні сполуки (НМЛОС) та бензопірен.

Базовими інформаційними показниками для розрахунку викидів є статистичні дані про споживання палива пересувними джерелами (автомобільного бензину, дизельного палива, скрапленого та стисненого природного газу, авіаційного бензину, реактивних палив типу гасу, мазутів тощо), отримані за даними державних статистичних спостережень «Звіт про залишки і використання енергетичних матеріалів та продуктів перероблення нафти»).

Питомі викиди забруднюючих речовин і парникових газів визначаються на основі довідників і методичних рекомендацій, затверджених Міністерством охорони навколишнього природного середовища України з урахуванням міжнародних факторів викидів, наведених у керівництві ЕЕА/ЕМЕР (2021).

Викиди свинцю оцінюються лише для споживання етильованого бензину, частка якого наразі практично відсутня у структурі споживання палива в Україні. Викиди CO₂, навпаки, визначаються для всіх основних видів вуглеводневого палива (бензину, газойлів, авіаційного та реактивного палива, гасу для технічних цілей тощо).

Розрахунки обсягів викидів здійснюються щорічно в розрізі адміністративно-територіальних

одиниць України (за КОАТУУ), видів економічної діяльності (КВЕД) та організаційно-правових форм господарювання (КОПФГ).

Удосконалення українських методик розрахунку викидів безпосередньо пов'язане з гармонізацією із Стратегією сталої і розумної мобільності Європейського Союзу (2020), що є ключовим інструментом реалізації Європейського зеленого курсу (European Green Deal). Метою цієї стратегії є скорочення викидів від транспорту на 90 % до 2050 р. шляхом:

- масштабного переходу до транспорту з нульовими або мінімальними викидами (електромобілі, водневі транспортні засоби, велосипеди, мікромобільність);
- електрифікації вантажного транспорту та переведення логістичних потоків на залізничний і водний транспорт;
- використання відновлюваної енергії у транспортних системах;
- впровадження принципу «забруднювач платить», тобто екологічного оподаткування викидів вуглецю;
- створення цифрових і мультимодальних систем мобільності для пасажирських і вантажних перевезень.

Для пасажирських перевезень передбачено реалізацію концепції «єдиного транспортного квитка», інтеграцію міжміських і міських маршрутів, підвищення доступності транспорту для осіб з інвалідністю та маломобільних груп населення.

Україна з 2022 р. бере курс на адаптацію своєї транспортної політики до принципів Європейського зеленого курсу. У Національному плані з енергетики та клімату до 2030 р. передбачено скорочення викидів транспорту на 25–30 % порівняно з рівнем 2019 р., розвиток електромобільної інфраструктури (понад 50 000 зарядних станцій до 2030 р.), модернізацію рухомого складу «Укрзалізниці» з урахуванням електрифікації колій та перехід міських транспортних систем на електричний громадський транспорт.

Безпека дорожнього руху є одним із ключових напрямів сучасної транспортної стратегії України, що узгоджується з Європейською стратегією «Vision Zero». Її головною метою є зниження смертності на дорогах до мінімальних показників і досягнення нульового рівня смертей унаслідок дорожньо-транспортних пригод (ДТП) у країнах Європейського Союзу до 2050 року. Для цього особливу увагу приділено боротьбі з трьома основними чинниками, що спричиняють більшість фатальних аварій: перевищення швидкості, керування транспортом у стані алкогольного сп'яніння та відволікання уваги під час руху (зокрема, використання мобільного телефону).

Висновки. Інвентаризація викидів забруднюючих речовин в атмосферу є базовим інструментом державного екологічного контролю та планування

заходів щодо зниження антропогенного навантаження на довкілля. Вона включає детальну характеристику технологічних процесів, оцінку ефективності газоочисного обладнання та систем вентиляції з погляду формування, транспортування і відведення забруднюючих речовин, а також визначення параметрів стаціонарних і неорганізованих джерел викидів. На підставі отриманих результатів здійснюється коригування нормативів гранично допустимих викидів (ГДВ) і планування природоохоронних заходів.

Зменшення обсягів викидів забруднюючих речовин залізничним транспортом можливе завдяки комплексній реалізації технічних, організаційних і енергетичних рішень, зокрема:

- Переведення більшої частки вантажних перевезень з автомобільного на залізничний транспорт. Згідно з даними «Укрзалізниці» та Міністерства інфраструктури України, частка залізничних перевезень знизилася з 60 % у 2010 році до 51,6 % у 2022 році. Відновлення та розширення електрифікованої ін-

фраструктури дозволить повернути цей показник до рівня понад 70–75 %, що значно скоротить вуглецевий слід у транспортному секторі.

- Розширення електрифікації залізничної мережі. Наразі рівень електрифікації становить 47,2 %, тоді як до 2030 року планується його збільшити щонайменше до 70 %. Це сприятиме скороченню викидів CO₂ та підвищенню енергоефективності перевезень.

- Відмова від використання твердого палива (вугілля) для опалення пасажирських вагонів. Перехід на електричне або інше низьковуглецеве опалення відповідає європейським екологічним стандартам і дозволяє мінімізувати забруднення атмосферного повітря на вокзалах та станціях.

- Збільшення частки пасажирських перевезень залізницею до 15 %. Для досягнення цієї мети необхідне підвищення якості сервісу, швидкості руху поїздів та інтеграція залізниці в систему сталого міського транспорту.

Література

1. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25 червня 1991 р. № 1264-XII // База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12> (дата звернення: 24.10.2025).
2. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 16 жовтня 1992 р. № 2707-XII // База даних «Законодавство України». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 26.10.2025).
3. Конвенція про трансграничне забруднення повітря на великі відстані // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_223#Text (дата звернення: 26.10.2025).
4. Стокгольмська конвенція про стійкі органічні забруднювачі // База даних «Законодавство України» URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_a07#Text (дата звернення: 21.10.2025).
5. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_044#Text (дата звернення: 20.10.2025).
6. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від автотранспорту, що перебуває у приватній власності населення: затв. наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 28 квітня 2009 р. № 204. Київ, 2009. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0410-09> (дата звернення: 19.10.2025).
7. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря автотранспортом, який використовується суб'єктами господарської діяльності та іншими юридичними особами всіх форм власності: затв. наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 10 грудня 2008 р. № 541. Київ, 2008. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1137-08> (дата звернення: 26.10.2025).
8. Методика розрахунку викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від авіаційного, водного та залізничного транспорту: затв. наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27 червня 2006 р. № 309. Київ, 2006. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0912-06> (дата звернення: 26.10.2025).
9. *Ukraine's Greenhouse Gas Inventory 1990–2023*. Annual National Inventory Report for Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Paris Agreement. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2025/03/Ukraine_NID_2025.pdf (дата звернення: 22.10.2025).
10. Climate Action Tracker. URL: <https://climateactiontracker.org> (дата звернення: 23.10.2025).
11. Climate Analytics. Транспорт – 1.5°C National Pathway Explorer. URL: <https://1p5ndc-pathways.climateanalytics.org/countries/ukraine/sectors/transport>. (дата звернення: 26.10.2025).
12. Volchyn, I.A., Haponych, L.S. Estimation and forecasting of carbon dioxide emissions from coal-fired thermal power plants in Ukraine. Науковий вісник НГУ, 2022. № 5. С. 80–89.
13. CoM Default Emission Factors for the Eastern Partner countries – Version 2017. URL: <https://jeodpp.jrc.ec.europa.eu/ftp/jrc-opendata/COM-EF/dataset/come/JRC-CoM-EF-CoME-EF-2017.pdf> (дата звернення: 26.10.2025).
14. *CORINAIR*. URL: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/corinair> (дата звернення: 24.10.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ВПЛИВ БУДІВЕЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНІ ЗВ'ЯЗКИ МІЖ КОМПОНЕНТАМИ ЛАНДШАФТУ

Зеленчук І.Д., Сонько С.П.

Уманський національний університет

вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань

zelenchuk.id@gmail.com

Розглянуто будівельну діяльність як один із головних чинників антропогенної деструкції ландшафтних систем та порушення структурно-функціональних зв'язків між їхніми компонентами. У ході дослідження доведено, що зведення будівель і споруд зумовлює трансформацію мезорельєфу, механічне ущільнення й запечатування ґрунтового покриву, зміну гідрологічного режиму та формування техногенних ґрунтів. Такі зміни призводять до зниження фільтраційних властивостей ґрунтів, погіршення умов функціонування біоти та зменшення екологічної стійкості природно-територіальних комплексів (ПТК).

Об'єктом дослідження виступають структурно-функціональні зв'язки ландшафтних систем, а предметом – вплив будівництва, зокрема модульних і швидкокомпонтованих будівель, інертні, мобільні та живі компоненти ландшафту. Найбільш уразливими визначено інертні компоненти – ґрунти, рельєф і геологічну основу. Проведені розрахунки навантажень від роботи важкої будівельної техніки показали, що чорноземи та інші ґрунти з низькими механічними властивостями зазнають інтенсивнішого ущільнення й деградації. Встановлено, що мобільні компоненти також зазнають певного впливу через викиди від роботи будівельної техніки та трансформацію інфільтраційних процесів у ґрунтах. Живі компоненти ландшафту реагують пригніченням рослинного покриву, зменшенням доступності вологи, дестабілізацією трофічних зв'язків і скороченням чисельності видів чутливих до шумового та вібраційного навантаження.

Окремо проаналізовано сучасні технології модульного та швидкокомпонтованого будівництва. Встановлено, що їх застосування зменшує масштаб і тривалість негативних впливів на ландшафтні системи завдяки скороченню будівельного циклу, зменшенню обсягів земляних робіт, скороченню етапу бетонування та відсутності зварювальних процесів. Разом із тим, навіть за умов впровадження іновативних будівельних технологій, повне усунення порушень структурно-функціональних зв'язків між компонентами ландшафту є неможливим.

Практична цінність дослідження полягає у можливості використання його результатів для вдосконалення екологічного моніторингу, процедур оцінки впливу на довкілля (ОВД) і стратегічної екологічної оцінки (СЕО). Отримані результати можуть бути інтегровані у практику просторового планування для післявоєнного відновлення території України з урахуванням вимог Європейської екологічної стратегії. робота формує наукове підґрунтя для міждисциплінарних досліджень у галузях ландшафтно-ї екології, геоєкології, ґрунтознавства та конструктивної географії, а також може бути використана у навчальному процесі для підготовки фахівців з наук про Землю, екології містобудування. *Ключові слова:* інертні компоненти ландшафту, взаємодія між компонентами, літогенна основа, запечатування ґрунтів, екраноземи, біота, швидкокомпонтовані будівлі.

The impact of construction activity on the structural and functional relationships between landscape components. Zelenchuk I., Sonko S.

Construction activity is considered one of the key drivers of anthropogenic destruction of landscape systems and disruption of structural and functional linkages between their components. The study demonstrates that the erection of buildings and structures leads to the transformation of mesorelief, mechanical compaction and sealing of soil cover, alteration of the hydrological regime, and the formation of technogenic soils. These processes, in turn, reduce the filtration capacity of soils, deteriorate conditions for biotic functioning, and diminish the ecological stability of natural territorial complexes (NTCs).

The object of the study is the structural and functional linkages of landscape systems, while the subject is the impact of construction activities – particularly modular and prefabricated buildings–on the inert, mobile, and biotic components of landscapes. Inert components, such as soils, relief, and the geological substrate, have been identified as the most vulnerable. Calculations of load parameters from heavy construction machinery demonstrated that chernozems and other soils with low mechanical resistance undergo more intensive compaction and degradation. It was also established that mobile components are affected through emissions from construction machinery and modifications of infiltration and drainage processes in soils. Biotic components respond with suppression of vegetation cover, reduced water availability, destabilization of trophic chains, and a decline in populations of species sensitive to noise and vibration stress.

Modern modular and prefabricated construction technologies are examined separately. Their application is shown to reduce the scale and duration of adverse impacts on landscape systems due to shorter construction cycles, reduced earthworks, shorter concreting stages, and the absence of welding processes. Nevertheless, even under conditions of innovative technological implementation, the complete elimination of disruptions to structural and functional linkages between landscape components remains unattainable.

The practical significance of the study lies in the potential use of its results for improving environmental monitoring systems, environmental impact assessment (EIA) procedures, and strategic environmental assessment (SEA). The findings can be integrated into

spatial planning practices for Ukraine's post-war recovery, with due consideration of the requirements of the European environmental strategy. Furthermore, the study provides a scientific basis for interdisciplinary research in landscape ecology, geoecology, soil science, and constructive geography, and it may also be employed in academic curricula for the training of specialists in Earth sciences, ecology, and urban planning. *Key words:* inert landscape components, intercomponent interactions, lithogenic base, soil sealing, ekranosols, biota, prefabricated buildings.

Постановка проблеми. Будівельна діяльність у сучасному розумінні охоплює не лише міську урбозабудову, а й позаміські промислові, виробничі будівлі та інші інженерні об'єкти, зокрема логістичні комплекси, індустріальні кластери, переробні майданчики, енергетичну інфраструктуру, магістральні трубопроводи, інженерно-транспортні коридори та інше. Власне, зазначені об'єкти входять до таких типів ноосферних екосистем, як урбоекосистеми та інфраекосистеми [1].

Вищезгадані проекти реалізуються шляхом відведення нових територій і супроводжуються масштабними земляними роботами, що зумовлює трансформацію ландшафтних комплексів, зокрема зняття родючого шару, ущільнення та запечаткування ґрунтів (soil sealing). Ці процеси порушують матеріально-енергетичні потоки та структурно-функціональні зв'язки між компонентами ландшафту (рельєфом, ґрунтами, поверхневими та підземними водами, біотою й атмосферою) [2].

Наслідком будівельної діяльності є зміна гідрологічного режиму, зростання поверхневого стоку, скорочення інфільтрації та трансформація часової структури паводкових процесів; відбувається фрагментація оселищ, деградація ґрунтових функцій і зниження рівня екосистемних послуг. Специфічний вплив справляють лінійні споруди (автомобільні дороги й залізниці, надземні трубопроводи тощо), які формують «зони ефекту дороги» (road-effect zones), де накопичуються бар'єрні, крайові, шумові та світлові ефекти, а також зростає смертність фауни на шляхах міграції [3]. Будівництво лінійних об'єктів посилює структурну й функціональну фрагментацію ландшафту та знижує зв'язність біотичних популяцій [4]. Довготривалі дослідження європейських екологів і ландшафтознавців засвідчують широкий спектр «ефектів дороги» та підтверджують, що у глобальному масштабі фрагментація ландшафтів знижує біорізноманіття на 13–75 % і порушує ключові екосистемні функції через руйнування функціональних зв'язків між компонентами геосистем, зокрема зміни біомаси та кругообігу речовин [5].

Нагальна потреба у відновленні та післявоєнній відбудові України надає темі дослідження особливої наукової й практичної ваги. Згідно з четвертою оцінкою збитків і потреб України, Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4), підготовленою Урядом України спільно зі Світовим банком, Єврокомісією та ООН, за період з лютого 2022 р. по грудень 2024 р. визначено потреби на відновлення в обсязі 524 млрд дол. США на наступне десятиріччя, при цьому найбільші інвестиції спрямовуватимуться у житловий,

транспортний та енергетичний сектори економіки [6]. Реалізація таких проєктів стане одним із ключових чинників зайняття нових земель та ущільнення ґрунтового покриву внаслідок відведення нових територій під забудову, спорудження допоміжної інфраструктури та лінійних об'єктів.

Незалежні оцінки Київської школи економіки (KSE) станом на листопад 2024 р. підтверджують масштаб руйнувань, засвідчуючи орієнтовно 170 млрд дол. США прямих пошкоджень інфраструктури та домінування втрат у житловому й транспортному секторах, що корелює з майбутнім профілем будівельного навантаження на ландшафти [7].

У цих умовах науково обґрунтоване планування відбудови потребує врахування положень Європейської екологічної стратегії «No Net Land Take» (NNLT) та програм Європейського агентства з довкілля (European Environment Agency, EEA) [8] у поєднанні з методами просторово-ландшафтного аналізу. Виникає необхідність у кількісному оцінюванні та просторово узгодженому описі впливів будівельної діяльності на структурно-функціональні зв'язки між компонентами ландшафту з подальшим використанням результатів для екологічно орієнтованого планування й управління процесами відновлення.

Актуальність дослідження. З метою забезпечення сталого відновлення та релокування промислових, виробничих і складських потужностей у більш безпечні регіони України проблема впливу будівельної діяльності на структурно-функціональні зв'язки ландшафтів набуває комплексного значення, адже виходить за межі опису окремих компонентів і потребує системних оцінок, що враховують морфологічні, гідрологічні та біотичні процеси [9].

З ландшафтно-географічної точки зору актуальність теми визначається сукупністю взаємопов'язаних чинників зокрема, прискореним зростанням площ штучних поверхонь унаслідок масштабних будівельних проєктів, що призводить до ущільнення ґрунтів і пригнічення їх екосистемних функцій. Це створює потребу у впровадженні індикаторного моніторингу землекористування в тому числі врахування вимог Європейського законодавства з охорони довкілля та показника Net land take (NLT), що дозволяє визначати чистий баланс конверсії земель [8]. Ось чому актуальність дослідження зумовлена необхідністю науково обґрунтованої кількісної оцінки змін у системі структурно-функціональних зв'язків між рельєфом, ґрунтами, поверхневими й підземними водами, рослинним і тваринним світом, а також атмосферою приземного шару.

Складність проблеми полягає у багаторівневому характері процесів – від локальних модифікацій мікрорельєфу до регіональної фрагментації оселищ, наявності порогових станів і накопичувальних ефектів. А також необхідності поєднання морфологічних показників, гідрологічних характеристик та біотичних індикаторів [10]. Саме така інтегрована постановка проблеми дозволяє перейти від констатації локальних змін до відтворюваної оцінки наслідків будівництва для функціонування ландшафтних систем і збереження їх екосистемних послуг.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Головними завданнями, які стоять перед дослідниками, є вивчення трансформаційних процесів у ландшафтах та розуміння ноосферної парадигми у галузі ландшафтно-екології й геоєкології, зокрема в частині оцінки взаємодії морфологічних, гідрологічних і біотичних компонентів ландшафтних комплексів під впливом будівельного навантаження.

У практичному аспекті дослідження відповідає завданням післявоєнного відновлення України, що передбачає сталий розвиток виробничо-промислових, логістичних та інших інфраструктурних об'єктів. Запропоновані методичні підходи до кількісної оцінки змін у структурно-функціональних зв'язках ландшафтів можуть бути використані для наукового обґрунтування просторового планування, створення систем моніторингу впливу будівельної діяльності на природне середовище та формування програм екологічного управління в умовах інтенсивного відновлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

З огляду на актуальність дослідження та наявність відкритого доступу до значного масиву даних щодо впливу будівельної діяльності на ландшафтні комплекси та їхні компоненти, в останні роки посилюється інтерес українських і зарубіжних ландшафтознавців до вивчення порушень взаємодії між живими та інертними компонентами ландшафту, а також до проблеми втрати екосистемних послуг унаслідок будівельних процесів. В цьому контексті досить інформативним є дослідження учених ЕЕА, які дослідили, що у період з 2012 по 2018 рік чисте захоплення земель для будівельних цілей у країнах ЄС становило 450 км² щорічно [8].

Ученні ЕЕА ввели так званий індикатор, який системно описує перетворення природних земель на штучні поверхні та запропонували узгоджену методику для відстеження чистого балансу конверсії земель у часових зрізах. Для теми нашого дослідження це слугувало базовим інструментом кількісної оцінки землезайняття та запечатування ґрунтів в результаті будівельної діяльності. Американський учений, дослідник у галузі ландшафтно-екології А. Т. Keeley разом із колегами у своїй праці [10] систематизував понад тридцять метрик оцінки порушень просторової та функціональної зв'язності

ландшафтних систем. Автори довели, що коректний вибір метрики є визначальним для оцінки порушень екологічних коридорів під впливом будівництва.

Результати цього дослідження становлять важливу методологічну основу для нашої теми, оскільки будівельна діяльність спричиняє фрагментацію ландшафтів та порушує структурно-функціональні зв'язки між їх біотичними й інертними компонентами. Запропоновані А. Т. Keeley підходи забезпечують можливість кількісної оцінки таких змін і визначення оптимальних методик. Значну увагу вивченню впливу ущільнення ґрунтів на взаємодію між інертними та живими компонентами ландшафту приділяють не лише європейські, а й східноазійські дослідники. Так, японський дослідник структури популяцій та екологічних процесів Т. Niura у своєму дослідженні [11] довів, що механічне ущільнення під час будівельних робіт знижує пористість і водопроникність ґрунту, що призводить до деградації біорізноманіття. Подібні результати отримав дослідник рослинно-ґрунтових взаємодій М. Asif у роботі [12], підкресливши негативний вплив ущільнення на мікробіоту ґрунтів і життєздатність рослинних угруповань.

Зазначені праці підтверджують, що будівництво порушує не лише морфологічний шар, а й функціональні взаємозв'язки між такими компонентами, як ґрунти ↔ біота ↔ гідрологічні умови.

Основним чинником механічного ущільнення ґрунтів є наслідки залучення будівельної техніки та механізмів до виконання будівельно-монтажних робіт (БМР), що зумовлює тривалі кумулятивні ефекти та потребує відновлювальних і рекультиваційних заходів [13]. Розширення забудови збільшує непроникні ділянки ландшафтів, що сприяє негативним гідрологічним наслідкам на рівні територій або урочищ. Навіть часткове збільшення непроникних поверхонь веде до значних змін у режимі стоку, особливо під час зливово-дощових періодів [14].

На основі виконаних досліджень у [2] можна зробити висновок, що еволюція ландшафтів України відбувалася в умовах постійного зростання антропогенного навантаження, серед якого будівельна діяльність відіграє особливу роль. М. Гродзинський детально описав історико-географічні етапи розвитку геосистем, показавши, що структурно-функціональні зв'язки між рельєфом, гідрологічними системами та біотою найбільш чутливі саме до інтенсивного освоєння територій. У сучасному контексті це означає, що промислове, житлове та інфраструктурне будівництво є одним із головних факторів порушення вертикальної та горизонтальної взаємодії компонентів ландшафтних комплексів. Подальший аналіз засвідчує, що масштабне зростання забудови спричиняє трансформацію структурно-функціональних зв'язків, зокрема через фрагментацію територій і втрату екологічної стійкості, що потребує інтегральних методів оцінки у межах ландшафтознавчих досліджень [9].

Український географ, дослідник ландшафтів Денисик Г. І. разом із колегами, сформував системну класифікацію антропогенних ландшафтів України та визначив методологічні підходи до їх реконструкції [15]. Ґрунти-екраноземи, які формуються в умовах інтенсивної забудови, поступово втрачають свої природні фізико-хімічні властивості та здатність забезпечувати ключові екосистемні функції. Порушення структури й режиму таких ґрунтів руйнує взаємозв'язки між ґрунтовим покривом і біотою, зменшуючи стійкість екосистем [16]. Проблема збереження просторової та функціональної зв'язності ландшафтів ґрунтовно проаналізована в праці [17], присвяченій екологічним мережам. У роботі доведено, що формування локальних екомереж у районах інтенсивної забудови дозволяє частково компенсувати фрагментацію середовища та зберегти біотичну функціональність й взаємопов'язаність. У цьому контексті підходи, орієнтовані на створення та підтримку екомереж, виступають одним із ключових механізмів мінімізації негативних наслідків будівельної діяльності для ландшафтних систем.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У даній статті продовжується пошук розв'язків задачі комплексної інтегральної оцінки впливу будівельної діяльності на взаємодію між компонентами ландшафту. Попередні дослідження вітчизняних і зарубіжних учених дозволили окреслити основні напрями впливів: механічне руйнування й ущільнення ґрунтів, трансформацію рельєфу, зміну гідрологічних режимів та фрагментацію природних екосистем. Водночас системне поєднання цих процесів у єдиному аналітичному полі залишається недостатньо розробленим.

Зокрема, виявлено, що більшість досліджень зосереджується на окремих аспектах проблеми – геоморфологічних наслідках будівництва, деградації ґрунтового покриву чи втраті біорізноманіття. Значно менше уваги приділено інтегральному аналізу того, як ці зміни взаємодіють між собою і формують кумулятивний ефект на рівні природно-територіальних комплексів. Залишається відкритим питання про кількісне співвідношення між окремими видами впливів і їхній сукупний внесок у порушення вертикальних і горизонтальних зв'язків у геосистемах.

Окремою проблемою є нестача методичних підходів до врахування часових і просторових масштабів будівельних впливів. Дотепер переважали дослідження, які аналізують локальні зміни, тоді як регіональні та міжрегіональні наслідки індустріальної забудови оцінені фрагментарно.

Не менш важливим є виявлене у попередніх роботах протиріччя між потребами економічного розвитку та завданнями збереження екологічної стійкості територій. Важливість продовження досліджень зумовлена також недостатнім висвітленням проблеми у контексті зміни клімату, що значно підси-

лює впливи будівництва на водний баланс, стійкість ґрунтів та функціонування біотичних угруповань. Таким чином, у статті робиться спроба поєднати результати попередніх досліджень і спрямувати аналіз на ті аспекти, які залишаються найменш розробленими.

Новизна. У статті уточнено роль будівельної діяльності як чинника порушення структурно-функціональних зв'язків живих та інертних компонентів ландшафтів, що проявляється через взаємопов'язаний вплив на морфологію, ґрунти, гідрологію та біоту. Вперше здійснено інтегральний підхід до аналізу цих змін, який інтегрує оцінку вертикальних і горизонтальних взаємозв'язків у межах природно-територіальних комплексів.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні необхідності комплексного кількісного аналізу, що базується на інтеграції геоінформаційних методів, дистанційного зондування та індикаторів екологічної зв'язності. Це дозволяє оцінювати не лише локальні, а й системні ефекти впливу будівельної діяльності. Запропоновані положення формують методологічне підґрунтя для інтеграції принципів збереження екомереж у практику просторового планування та управління розвитком територій у процесі сталого відновлення України.

Методологічне або загальнонаукове значення. Це дослідження виконано з урахуванням Європейської екологічної стратегії NNLT, відповідно до програми Європейського агентства з довкілля ЕЕА [8], а також Державної екологічної політики України на період до 2030 року [18], у якій одним із ключових завдань визначено інтеграцію екосистемного підходу до галузевих політик, включно з будівельною сферою. Робота відповідає положенням Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки [19], де встановлено пріоритет щодо збереження екологічної стійкості територій у процесі їхнього відновлення. Дослідження також базується на положеннях Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» [20] та Закону України «Про стратегічну екологічну оцінку» [21], які регламентують процедури аналізу екологічних наслідків будівництва та реконструкції інфраструктурних об'єктів. Методологія дослідження корелює з вимогами Європейської ландшафтної конвенції [22], що визначає охорону, управління та планування ландшафтів як ключову складову просторового розвитку.

Найголовніше – структурний алгоритм дослідження інтегровано з планами державних та міжнародних програм післявоєнного відновлення України, зокрема з положеннями «Плану відновлення України» (Ukraine Recovery Plan) [23] та Національною програмою відновлення України, презентованою Урядом у 2023 р., де акцентовано необхідність екологічно збалансованої реконструкції промислової, житлової та транспортної інфраструктури у постраждалих регіонах.

Виклад основного матеріалу. Будівельна діяльність у сучасному суспільстві є одним із провідних чинників антропогенної трансформації ландшафтів. Просторовий вплив будівельних процесів поширюється за межі урбанізованих територій і охоплює промислові зони, транспортну інфраструктуру, логістичні комплекси, іноді й рекреаційні ділянки. Таке освоєння безумовно спричиняє вилучення земель, трансформацію рельєфу, зміну гідрологічного режиму, ущільнення ґрунтів і зменшення біотичного різноманіття. З розвитком світової промисловості антропогенне навантаження на навколишнє середовище постійно зростало, промисловість трансформувалась до великих промислових підприємств (гігантів), котрі були географічно розкиданими за принципом сировинної бази чи споживчого потенціалу певної території.

Будівельна діяльність – це складний процес, зумовлений соціально-економічними факторами, що відбувається з широким діапазоном темпів та просторових масштабів. В результаті будівництва, як правило назавжди вилучаються землі з інших галузей користування, землі сільського та лісового господарства зазнають найбільшого перетворення в результаті будівельної діяльності [24]. У наукових працях Європейських дослідників з довілля наголошується, що будівництво й урбанізація формують стійкі негативні тенденції, пов'язані із втратою водорегуляційних функцій, зменшенням потенціалу ґрунтів і водних систем в зв'язку з секвестрацією вуглецю та погіршенням здатності геосистем підтримувати екосистемні послуги [8].

Вплив будівництва на компоненти ландшафту та порушення їхньої взаємодії наразі досліджується обмеженим колом українських і європейських географів та ландшафтознавців. Ученими доведено, що будівельні роботи негативно впливають не тільки на ґрунт та рослинність, але й на всю систему екологічних зв'язків в ландшафтних комплексах.

Проблематика дослідження впливу будівельної діяльності на структурно-функціональні зв'язки між компонентами ландшафту безпосередньо пов'язана з уточненням базового поняття «ландшафт» у сучасній науковій традиції. У науковій літературі існує низка підходів до його визначення, що відображають різні школи та методологічні орієнтири у географії та екології.

В українській ландшафтознавчій школі М. Д. Гродзинський розглядає ландшафт як генетично цілісний природно-територіальний комплекс, сформований у процесі тривалої взаємодії літогенних, біотичних та антропогенних чинників, що характеризується внутрішньою системністю та ієрархічною організацією [2]. Німецький географ С. Troll один із основоположників ландшафтною теорії у класичному термінологічному дослідженні визначає ландшафт як просторово виражену єдність біотичних та абіотичних процесів, що підлягає інтегрованому гео-

графічному опису. Саме цей підхід поклав початок ландшафтній екології (Landschaftsökologie) як цілісній дослідницькій галузі [25].

Американські географи визначили ландшафт як морфологічну форму, що виникає унаслідок взаємодії природних і людських сил [26]. В подальшому цю ідею було розвинуто та запропоновано трактувати ландшафт як мозаїку екосистем, що функціонують у межах просторової структури, перебувають у динамічній взаємодії та змінюються під впливом природних і антропогенних факторів [27]. Цікаве визначення запропонував британський археолог і географ G. Bailey, який вважав, що *ландшафт* – це просторове середовище, яке відображає історію взаємодії природних та антропогенних процесів і може бути прочитане як історичний запис [28].

Таким чином, у сучасній географії поняття «ландшафт» має багатомірне трактування: від класичного системного до антропоцентричного та прикладного. Це дозволяє всебічно аналізувати трансформаційні процеси, зокрема ті, що зумовлені будівельною діяльністю.

Сутність структурно-функціональних зв'язків ландшафту полягає у взаємодії між його компонентами – літогенною основою, рельєфом, ґрунтовим покривом, водними системами, біотою та антропогенними елементами, які забезпечують цілісність і стійкість природно-територіального комплексу [29]. Структурний аспект відображає просторову організацію ландшафту, тобто взаємне розташування його компонентів, морфологічних одиниць і меж. Функціональний аспект охоплює обмін енергією, речовиною та інформацією між компонентами, що визначає здатність геосистеми до саморегуляції й підтримання екологічної рівноваги. Ще у 1970-х роках, французький географ-ландшафтознавець G. Bertrand підкреслював, що структурно-функціональні зв'язки забезпечують стійкість геосистем до зовнішніх впливів, а їх порушення призводить до каскадних змін – від деградації ґрунтів і зменшення водоутримуючої здатності до втрати біорізноманіття та зниження продуктивності екосистем [30].

У контексті цього дослідження особливого значення набуває проблема класифікації компонентів ландшафту. У географічній науці ландшафт розглядається як цілісна система, що складається з елементів, кожен з яких «репрезентує» певну геосферу географічної оболонки. Такі елементи прийнято визначати як природні географічні компоненти, до яких слід відносити – атмосферні маси, ґрунти, земну кору, гідросферу та біоту. Однак, класифікація компонентів ландшафту є складною й досі недостатньо опрацьованою проблемою, оскільки принципи її побудови можуть різнитися залежно від обраних критеріїв, на яких ґрунтується об'єднання або структурування компонентів у певні групи.

В українській географічній традиції природні компоненти ландшафту класифікують як основні, але компонентний склад ландшафту включає й специфічні складові – це насамперед клімат і рельєф. Базова схема поділу ландшафтних компонентів на основні та специфічні була запропонована доктором географічних наук А. В. П'яtkовою та проілюстрована на рис. 1. У європейській ландшафтознавчій практиці застосовується також класифікація компонентів за їхніми динамічними властивостями. Вперше такий підхід був запропонований латвійським географом А. А. Крауклісом, який здійснив ієрархічно-структурний поділ компонентів ландшафту на мобільні, активні, а також інертні відповідно до їхніх функцій у структурі й динаміці геосистем.

У даному дослідженні також дотримано ідеї ієрархічно-функціонального поділу компонентів ландшафту. Ієрархічна класифікація компонентів ландшафту з урахуванням їхніх функцій у геосистемі уточнена у структурній схемі на рис. 2. Такий підхід не лише систематизує характеристики складових ландшафту, а й формує методологічне підґрунтя з метою подальших ландшафтознавчих досліджень у географії та геоекології.

Аналізуючи представлену на рис. 2 ієрархічну класифікацію компонентів ландшафту, очевидним є те, що серед їхнього переліку недостатньо дослідженими й надалі залишаються інертні компоненти. Сучасна географічна галузь володіє достатньою кількістю матеріалів стосовно мобільних та активних компонентів ландшафту, але в частині впливу будівельної діяльності на ґрунти, земну кору та рельєф, все ще потребують значних системних досліджень.

Потрібно врахувати те, що в місцях промислової забудови поступово утворюються техногенні ланд-

шафти, котрі успадковують лише геологічну (літогенну) основу і частково окремі риси рельєфу.

У сучасній будівельній практиці спостерігається тенденція до активного впровадження інноваційних технологій, що забезпечують не лише прискорення темпів зведення об'єктів, а й оптимізацію використання ресурсів та сировини. Подібна динаміка зумовлена потребою у швидкому розв'язанні критично важливих завдань, зокрема оперативної відбудови та реконструкції інфраструктури й житлового фонду, пошкоджених унаслідок воєнних дій на території України. Значний науковий інтерес спрямований на удосконалення будівельних матеріалів та розробку новітніх методів будівництва, серед яких – модульні споруди, швидкокомтовані будівлі (ШМБ) та prefab-рішення, що довели свою ефективність у практиці швидкого відновлення. Дослідники у сфері будівництва також акцентують увагу на застосуванні цифрових технологій (BIM-моделювання, GIS-аналіз, автоматизовані системи моніторингу) у процесі реконструкції, які дозволяють підвищити точність проєктних рішень та скоротити часові витрати [32].

Саме тому в межах даного дослідження проведено оцінку можливого впливу будівництва модульних і швидкокомтованих будівель на живі, інертні і частково на мобільні компоненти ландшафту. Проведено структурний, порівняльний аналіз наслідків зведення таких об'єктів за умов використання різних типів фундаментів. Модульні споруди та ШМБ розглядаються як сучасні збірні будівлі високого ступеня заводської готовності, що опираються на полегшені фундаменти. Основним конструктивним елементом таких будівель є несучий каркас, який заповнюється огорожуючими конструкціями високої енергоефек-

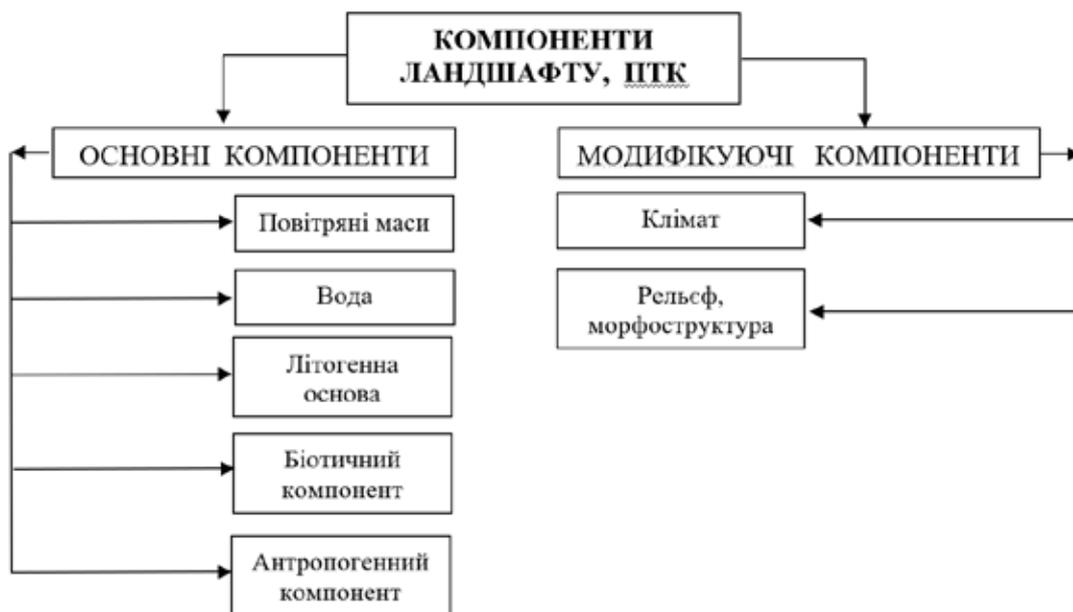


Рис. 1. Компонентний склад ландшафту [31]

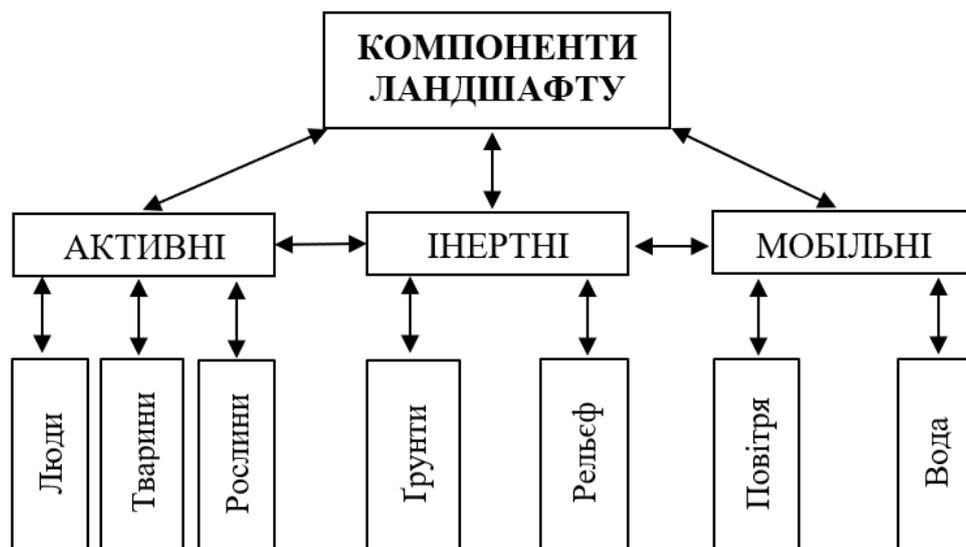


Рис. 2. Ієрархічна класифікація компонентів ландшафту [29]

тивності (сендвіч-панелі, мінераловатні набірні утеплювачі). Несучий каркас ШМБ, як правило, складається з уніфікованих полегшених металевих або бетонних самонесучих елементів, а у деяких випадках – з їх комбінованих варіантів.

Однак, масове застосування нових технологій можливе лише після ґрунтовної оцінки їхньої ефективності та екологічної безпечності, зокрема у контексті системи «людина – довкілля» [33]. Такий підхід відповідає принципам сталого просторового розвитку та екологічно орієнтованого планування, що інтегрує вимоги як національних стратегій, так і міжнародних екологічних стандартів.

Оцінка впливу на інертні компоненти ландшафту. У процесі будівельної діяльності, в зоні будівництва, зазвичай відбувається поступова трансформація мезорельєфу, зумовлена вирівнюванням будівельних майданчиків та прокладанням під'їзних шляхів шляхом зрізування підвищень або засипання ерозійних форм рельєфу.

Робота спеціалізованої будівельної та автомобільної техніки на майданчику, включаючи її маневрування та повторні переміщення, супроводжується значними механічними навантаженнями на ґрунтовий покрив. Це спричиняє порушення природної структури ґрунту, його ущільнення та зменшення пористості, що істотно змінює водно-повітряний режим і біологічну активність ґрунтів. Такі процеси призводять до зміни окисно-відновних умов у ландшафті, яка проявляється у просторовому та часовому вимірах, погіршуючи екологічних функцій інертних компонентів та зниження стійкості природно-територіальних комплексів.

В даній роботі дослідження виконувались на ґрунтах з різними механічними властивостями. Як модельний приклад було прийнято можливі навантаження від автосамоскид марки MAN із спорядже-

ною масою 62 т, шириною шин 385 мм і швидкістю руху 20 км/год. Отримані результати засвідчили, що ґрунти з нижчими механічними властивостями зазнають більш інтенсивного ущільнення під дією навантажень, ніж ґрунти з відносно вищими механічними показниками. Особливо негативний ефект зафіксовано на чорноземах, де виявляється швидка втрата пористості та зниження фільтраційної здатності верхніх горизонтів. Це, у свою чергу, призводить до погіршення екологічних функцій ґрунтового покриву та порушення структурно-функціональних взаємозв'язків у межах ПТК.

Оцінка впливу на мобільні компоненти ландшафту. Процес будівництва модульних споруд та сучасних ШМБ максимальної заводської готовності не передбачає зварювальних та фарбувальних робіт, оскільки металеві елементи каркасу, як правило, мають оцинковане покриття і монтуються за допомогою болтових з'єднань в готові отвори, що виконані заводі виробнику. Таким чином, утворення викидів шкідливих речовин, характерних для зварювальних і фарбувальних процесів, що наведені у табл. 1, за умови дотримання регламентованого будівельного процесу можна уникнути, що істотно знижує рівень техногенного навантаження на повітряне середовище.

Єдиним площинним джерелом негативного впливу на повітряне середовище в період виконання БМР є викиди від експлуатації автомобільної будівельної техніки та механізмів. У результаті їх роботи, в атмосферу викидаються характерні для вихлопних газів речовини, зокрема: діоксид азоту, оксид вуглецю, сірчистий ангідрид, тверді частинки (сажа) та леткі вуглеводні.

Вплив на водний режим в період зведення вищевказаних будівель та споруд зумовлений певною потребою у воді для господарсько-побутового забез-

Таблиця 1

Забруднюючі речовини, що утворюються в процесі виконання зварювальних і фарбувальних робіт

Забруднююча речовина	Хімічна формула	ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки
Оксиди заліза	FeO, Fe ₂ O ₃	0,04	2
Марганець та його оксиди	MnO, MnO ₂	0,01	2
Бутилацетат	C ₆ H ₁₂ O ₂	0,1	4
Толуол	C ₆ H ₅ CH ₃	0,6	3
Етанол	C ₂ H ₅ OH	1,0	4
Ацетон	(CH ₃) ₂ CO	0,35	4
Бутанол	C ₄ H ₉ OH	1,0	4

печення будівельників. Такі витрати водних ресурсів забезпечуються за рахунок привозної питної та технічної води і належать до безповоротних страт тому в об'єми водовідведення не включаються. Організація виконання будівельно-монтажних робіт передбачає облаштування на будівельних майданчиках біотуалетів, що виключає потрапляння фекальних стоків у водне середовище та ґрунтовий покрив. Подальше знешкодження зазначених стоків здійснюється спеціалізованими підприємствами відповідно до чинних угод і нормативних вимог [34]. Однак, в результаті будівництва спостерігається вплив на гідрологічний режим спричинений механічним ущільненнями ґрунтів.

Оцінка впливу на активні компоненти ландшафту. Будівництво модульних споруд та швидко-монтажних будівель відзначається нижчим рівнем деструктивного впливу на біотичні компоненти ландшафту порівняно з традиційними технологіями. Скорочений цикл робіт зменшує тривалість антропогенного тиску на екосистеми.

Біота зазнає переважно непрямих змін: рослинність пригнічується через пошкодження ґрунту та порушення водного режиму, фауна – внаслідок розриву трофічних ланцюгів, дезорієнтації міграцій і зниження чисельності деяких чутливих видів.

Менші обсяги земляних робіт і бетонування та відсутність етапу зварювання знижують масштаби негативного впливу. Вплив не усувається повністю, проте залишається менш інтенсивним і короткотривалим порівняно з класичними методами будівництва.

Особливо вразливими до таких втручань є ландшафти, сформовані на високогумусних чорноземах. У межах таких територіальних комплексів трансформація водного режиму та підвищена схильність ґрунтів до ущільнення, зумовлена їхніми низькими механічними властивостями, що в свою чергу сприяє розвитку ерозійних процесів, утворенню обвалів і деградації схилів. На ділянках із надмірним ущільненням ґрунтів можливе формування заболочених ділянок, за умови інтенсивного дощового режиму

та недостатнього дренажування у верхніх ґрунтових шарах. Подібні трансформації не лише порушують природну рівновагу, але й спричиняють тривале порушення зв'язків між інертними та живими компонентами ландшафтів.

Головні висновки. Проведене дослідження засвідчило, що будівельна діяльність виступає одним із провідних антропогенних чинників трансформації природно-територіальних комплексів, що зумовлює деструкцію їхніх інертних, мобільних та компонентів. Встановлено, що ґрунти, геологічна основа та рельєф залишаються найбільш уразливими елементами ландшафтно-структури, оскільки саме вони першими реагують на механічний вплив будівельної техніки, ущільнення та запечаткування поверхні, що призводить до зниження фільтраційної здатності, погіршення водно-повітряного режиму та активізації ерозійних процесів. Окрему роль відіграють мобільні компоненти, зокрема атмосфера та гідросфера, на які впливають викиди будівельної техніки та трансформація інфільтраційно-дренажних властивостей ґрунтів. Біотичні компоненти реагують пригніченням рослинного покриву, зменшенням доступності вологи, дестабілізацією трофічних зв'язків і скороченням чисельності видів, чутливих до шумового та вібраційного навантаження.

Доведено, що застосування модульних і швидко-монтажних металокаркасних будівель з високим ступенем заводської готовності дає змогу суттєво знизити інтенсивність і тривалість впливу на природні системи, оскільки скорочується період будівельних робіт, зменшуються обсяги земляних робіт, відсутня потреба у тривалому бетонуванні та зварювальних процесах, що значно зменшує рівень техногенного навантаження. Проте, навіть за таких умов вплив на ландшафтні комплекси не усувається повністю, що зумовлює необхідність подальших комплексних досліджень та розроблення системи моніторингу й адаптивних природоохоронних заходів, спрямованих на збереження екологічної стійкості територій у процесі відновлення та розвитку.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані становлять основу для вдосконалення процедур оцінки впливу на навколишнє середовище та стратегічної екологічної оцінки у будівельній галузі, що відповідає вимогам Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» та положенням Європейської ландшафтної конвенції. Результати дослідження можуть бути застосовані для формування науково обґрунтованих критеріїв при виборі технологій будівництва модульних та швидкокомтованих споруд з урахуванням їх впливу на структурно-функціональні зв'язки компонентів ПТК.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання його результатів у процесі ре-

лізації програм післявоєнного відновлення, зокрема «Плану відновлення України» (Ukraine Recovery Plan), де передбачено необхідність екологічно збалансованої реконструкції промислової, житлової та транспортної інфраструктури. Результати можуть бути інтегровані з діяльністю Європейського агентства з довкілля ЕЕА в частині досягнення цілей політики «No Net Land Take» до 2050 року.

Крім того, результати дослідження створюють перспективу для подальших міждисциплінарних наукових пошуків у сферах ландшафтної екології, геоелекології, ґрунтознавства та конструктивної географії, а також можуть бути використані у навчальному процесі для підготовки фахівців з екології, наук про Землю та містобудування.

Література

1. Sonko S. Man in Noosphere: Evolution and Further Development. *Philosophy and Cosmology. The Academic Journal*. 2019. Vol. 22. P.51–75. Kyiv, DOI: <https://doi.org/10.29202/phil-cosm/22/5>
2. Гродзинський, М. Д. Еволюція ландшафтів України: ландшафтознавчо-географічний вимір проблеми: монографія. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2023, 432 с.
3. R. T. T. Forman, R. D. Deblinger. The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. *Conservation Biology*. 2000; Vol. 14, No. 1, P. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.99088.x>
4. R. T. T. Forman, L. E. Alexander. Roads and Their Major Ecological Effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1998; Vol. 29, P. 207–231. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207>
5. N. M. Haddad, L. A. Brudvig, J. Clobert, et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems // *Science Advances*. 2015; Vol. 1, e1500052. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>
6. Уряд України; World Bank Group; Європейська комісія; Організація Об'єднаних Націй. Ukraine – Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4): February 2022 – December 2024. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022025114040022/pdf/P180174-ca39eccd-ea67-4bd8-b537-ff73a675a0a8.pdf> (дата звернення: 03.10.2025).
7. Andrienko D.; Goriunov D.; Grudova V.; Markuts J.; Marshalok T.; Neyter R.; Piddubnyi I.; Studennikova I.; Topolskov D. Report on Damages to Infrastructure from the Destruction Caused by Russia's Military Aggression Against Ukraine as of November 2024. – Kyiv: KSE Institute. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2025/02/KSE_Damages_Report-November-2024---ENG.pdf (дата звернення: 03.10.2025).
8. European Environment Agency. Net land take in cities and commuting zones in Europe. 8th EAP Indicator. 2023. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/net-land-take-in-cities> (дата звернення: 03.10.2025р).
9. Grodzynski, Mykhailo. Landscape science in Ukraine: The current state and trends. *Czasopismo Geograficzne*, 2022; Vol. 93, No. 3. P. 399–416. DOI: <https://doi.org/10.12657/czageo-93-15>
10. A. T. H. Keeley, P. Beier, J. S. Jenness, Connectivity metrics for conservation planning and monitoring. *Biological Conservation*. 2021; Vol. 255, (109008). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2021.109008>
11. T. Hiura, H. Okada, C. Terada, et al. Effects of soil compaction on above- and belowground interactions during the early stage of forest development. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2024; Vol. 102, (128565). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128565>
12. M. Asif, M. F. Nawaz, I. Ahmad, et al. Detrimental effects of induced soil compaction on morphological adaptation and physiological plasticity of selected multipurpose tree species. *Plants (Basel)*. 2023; Vol. 12, No. 13. Article 2468. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12132468>.
13. B. Zhang, Y. Li, J. Wang, X. Chen, et al. Soil compaction due to machinery impact: a review. *Land Degradation & Development*. 2024; Vol. 35, No. 10. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.5144>.
14. M. Navarro-Leblond, D. Moreno-Mateos, P. Pérez-Cutillas, et al. Soil sealing and hydrological changes. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; Vol. 18, Article. 9511. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189511>.
15. Denysyk, H, et al. Anthropogenic landscapes of Ukraine and their reconstruction. *Czasopismo Geograficzne*. 2022, Vol. 93, No. 3. P. 417–433. DOI: <https://doi.org/10.12657/czageo-93-16>
16. Борис Я., Телегуз О. Властивості екраноземів міста Львова. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2023. Вип. 1. С. 116–127. DOI: <https://doi.org/10.30970/gpc.2023.1.3950>
17. Максименко Н. В., Клещ А. А., Квартенко Р. О. Територіальна організація регіональної екологічної мережі Харківської області на ландшафтній основі: монографія. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2022. 200 с.
18. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2697-19> (дата звернення: 03.10.2025).
19. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки : Постанова від 05 серпня 2020 № 695. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/695-2020-%D0%BF> (дата звернення: 03.10.2025).
20. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23 квітня 2017 № 2059-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2059-19> (дата звернення: 03.10.2025).

21. Про стратегічну екологічну оцінку : Закон України від 20 березня 2018 № 2354-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2354-19> (дата звернення: 03.10.2025).
22. Council of Europe. European Landscape Convention. *Florence, 2000*: веб-сайт. URL: <https://www.coe.int/en/web/landscape/the-european-landscape-convention> (дата звернення: 03.10.2025).
23. Ukraine Recovery Conference. Ukraine Recovery Plan. *Lugano, 2022*: веб-сайт. URL: <https://recovery.gov.ua> (дата звернення: 03.10.2025).
24. FAO. Urbanisation and soil sealing. Rome: *Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2022*, No. 5. URL: <https://openknowledge.fao.org/bitstreams/8f842c13-0473-4ec6-b4a9-0fb7a6c89906/download> (дата звернення: 03.10.2025).
25. C. Troll. Landscape ecology (geoecology) and biogeocenology – A terminological study. *Geoforum*. 1971; Vol. 8, No. 1, P. 43–46. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-7185\(71\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0016-7185(71)90029-7)
26. C. O. Sauer. The morphology of landscape. *University of California Publications in Geography*, 1925; Vol. 2, No. 2, P. 296–315. URL: <https://www.scribd.com/doc/256866389/Sauer-1925-Morphology-of-Landscape> (дата звернення: 03.10.2025).
27. R. T. T. Forman, M. Godron. *Landscape Ecology*. New York: Wiley, 1986; P. 619 URL: <https://www.wiley.com/en-us/Landscape+Ecology-p-9780471870371> (дата звернення: 03.10.2025).
28. Bailey G. Time perspectives, palimpsests and the archaeology of time. *Journal of Anthropological Archaeology*. 2007; Vol. 26, No. 2, P. 198–223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaa.2006.08.002>
29. Сонько С. П., Зеленчук І. Д. Вплив будівництва на ландшафти лісостепової зони України. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 42. С. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-02>
30. G. Bertrand. Le paysage entre la Nature et la Société. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest*. 1978; Vol. 49, No. 2, P. 239-258. DOI: <https://doi.org/10.3406/rggpo.1978.3552>
31. П'яткова А., Роскос Н., Ландшафтознавство: прикладні аспекти. Навчально-методичний посібник. Одеса: ОНУ імені І. І. Мечникова, 2020. С. 122.
32. Як prefab-рішення допоможуть швидко відбудувати Україну. *Metinvest Media*. веб-сайт. URL: <https://metinvest.media/ua/page/yak-prefab-rshennya-dopomozhut-shvidko-vdbuduvati-ukranu> (дата звернення: 03.10.2025).
33. Сонько С.П., Максименко Н. В. Про «природність» та «антропогенність» ландшафтотворення. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології. Сучасні географічні та екологічні дослідження довкілля*. 2016. Вип. 25. С. 9-13. Режим доступу: URL: https://journals.urau.ua/ludina_dov/article/view/76759 (дата звернення: 03.10.2025).
34. Сонько С. П., Зеленчук І. Д. Використання новітніх технологій у будівництві для зменшення шкідливого впливу на інертні компоненти ландшафту. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2022. Вип. 35. С. 32–38. DOI: <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2022-35-04>

Дата першого надходження рукопису до видання: 06.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ПРО ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ПІДТВЕРДЖЕННЯ УМОВ ПОДОЛАННЯ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДИНОСТІ ЯК ПРИЧИНИ СТВОРЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Волошин В.С., Бурко В.А.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»
вул. Гоголя, 29, 49044, м. Дніпро
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu

В роботі надані результати експериментальних досліджень, які підтверджують основні положення принципу термодинамічної двоєдності, як механізму створення відходів в будь-якому технологічному процесі та основаному на ньому методі мінімізації відходів в межах самого технологічного процесу. В роботі використані дані так званих пасивних експериментів, які проводилися для технологій металургійної та харчової промисловості з метою виділення тих їх складових, які спроможні бути доказами або іншими аргументами на користь цих теоретичних досліджень. Розроблено методику пасивного експерименту, що базується на низці статистичних даних про хід та особливості технологічного процесу, включаючи його технологічні та теплотехнічні карти, порядок ведення технології, виявлення параметрів, що стали в нагоді, як технологічно помилкові або екстремальні для даного технологічного процесу, з подальшим виявленням їх впливу на процеси відходоутворення та залежностей від енергетичних параметрів технологічного процесу. Зокрема, це стосується таких особливостей технологічного процесу, які пов'язані із вводом в систему додаткових енергетичних джерел та їх вплив на стан і якість складової відходів, що отримуються. Встановлено у порівнянні технологій мартенівського вироблення сталі в умовах продувки ванни чистим киснем та без нього, та з киснево-конвертерним способом, що існує певна межа у використанні додаткової енергії, що вводиться в технологічний процес, яка може, не порушуючи цілісності основного процесу, певним чином впливати на ту частину сировинного потоку, з якої в звичайних умовах виходить відхід. Отримані опосередковані дані щодо діапазону відношення цієї енергії до базової енергії цього процесу в межах точки 0,62, як такої, що впливає на стан відхідної частини сировини, але не переводить технологічний процес у стан невизначеності та незворотності. Аналогічні дані з певною похибкою отримані і в технології випічки хліба, де, в межах пасивного експерименту, запропоновано використовувати в якості модифікованої базової енергії для отримання товарної продукції, інші види енергії для пропівання хлібу, зокрема, імпульсні джерела та резонансні засоби пропівання. Загальний висновок може стосуватися необхідностей у розвитку таких експериментальних досліджень для низки відомих технологічних процесів з метою підтвердження або аргументованого спростування цих залежностей, а значить і самої ідеї забезпечення мінімізації відходів у межах самого технологічного процесу. *Ключові слова:* промислові відходи, мінімізація, технологічний процес, енергія, зміна ентропії, термодинамічна неврвноваженість.

On experimental confirmation of the conditions for overcoming the principle of thermodynamic duality as the reason for the creation of industrial waste in technological processes. Voloshyn V., Burko V.

The paper presents the results of experimental studies that confirm the main provisions of the principle of thermodynamic duality as a mechanism for creating waste in any technological process and the method of minimizing waste within the technological process itself. The paper uses the data of the so-called passive experiments, which were carried out for the technologies of the metallurgical and food industries in order to identify those components that can be used as evidence for other arguments in favor of these theoretical studies. A passive experiment technique has been developed, based on a number of statistical data on the course and features of the technological process, including its technological and thermal maps, the procedure for conducting the technology, the identification of parameters that have become useful as technologically erroneous or extreme for this technological process, with the subsequent identification of their impact on the processes of waste generation and dependencies on the energy parameters of the technological process. In particular, this applies to such features of the technological process that are associated with the introduction of additional energy sources into the system and their impact on the condition and quality component of the resulting waste. It has been established in the comparison of the technologies of open-hearth steel production under the conditions of bath products with pure oxygen and without it and with the oxygen-converter method, that there is a certain limit in the use of additional energy introduced into the technological process, which can, without violating the integrity of the main process, in a certain way affect that part of the raw material flow, from which under normal conditions the waste is exited. Indirect data on the range of the ratio of this energy to the base energy of this process within the point of 0.62, as such that affects the state of the raw material waste part, but does not transfer the technological process to a state of uncertainty and irreversibility. Similar data with a certain error were obtained in the technology of baking bread, where, within the framework of a passive experiment, it was proposed to use other types of energy for baking bread as a modified base energy for obtaining marketable products, in particular, pulse sources and resonant baking means. The general conclusion may relate to the need for the development of such experimental studies for a number of known technological processes in order to confirm or reasonably refute these dependencies, and therefore the very idea of ensuring the minimization of waste within the technological process itself. *Key words:* industrial waste, minimization, technological process, energy, change in entropy, thermodynamic imbalance.

Постановка проблеми. Методи мінімізації промислових відходів в межах діючих та нових технологічних процесів потребують своєї аргументованої експериментальної бази та кількісних параметрів, таких що забезпечують стійкість технологічного процесу та, водночас, надають можливості для реалізації цілеспрямованого енергетичного впливу на ту частину сировини, яка в традиційному технологічному процесі переходить у відходи.

Актуальність дослідження. Існуючий стан боротьби з промисловими відходами, незважаючи на кількість створених способів та технічних рішень, спрямованих на їх мінімізацію, не призводить до радикального вирішення цієї проблеми, включаючи створення нових відходів від діючих виробництв. На кожну тону перероблених з числа раніше створених відходів, сучасна промисловість виробляє декілька нових тонн тих самих відходів. Стає актуальною тема мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі та максимального недопущення їх появи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1, 2, 3] розкритий механізм принципу термодинамічної двоєдності, як одна з основ створення промислових відходів. В основі принципу знаходиться поняття про те, що одна й та ж енергія технологічного процесу по різному впливає на різні компоненти технологічної сировини таким чином, що завдяки їй термодинамічному відношенню до базової енергії, що подається в технологічний процес, частина йде на отримання товарної продукції, а інша частина – на створення відходів.

Наразі у діючому металургійному виробництві, важко ставити промисловий експеримент який був би пов'язаний зі змінами в енергетичному балансі технологічного процесу. Існує метод прихованого експерименту, який пов'язаний з використанням особливостей нестандартних режимів ведення технологічного процесу [4]. Ці режими стосуються можливих помилок в організації технології, або інших умов, при яких технологічний процес йде з екстремальними значеннями основних показників [5]. Одним з таких прихованих експериментів у мартенівському виробництві стала технологія додаткового введення кисню в ванну мартенівської печі [6]. Метою таких змін в технологічному процесі була можливість підвищення інтенсивності виплавки мартенівської сталі, наближення її якості та темпів виробництва до конвертерного способу виробництва сталі. Але, наряду з цим, додаткова енергія, що потрапила до технологічного процесу з киснем, та екзотермічні реакції що її супроводжують, не могла не оказати впливу на хімічний склад і чисельні параметри відходів цього виробництва, шлаку та газів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрій присвячується означена стаття. Рішення поставлених проблем стикається з потребою в наведенні граничних умов для кількіс-

них показників, якими можна оперувати при управлінні виробничими, відходоутворюючими системами, стосовно з можливостями та специфікою для мінімізації відходоутворення в межах конкретного технологічного процесу.

Новизна та загальнонаукове значення. Аналітичні та експериментальні обмеження для параметрів, що характеризують відходоутворюючу залежність від енергетичної та термодинамічної складових для конкретного технологічного процесу складають підстави для створення виробничих систем і технологічних процесів нового покоління, з мінімальним відходоутворенням, що має суттєве значення в технологіях 5.0 як фактор людиноцентричності технологічних процесів.

Викладення основного матеріалу. Ми будемо зіставляти дані технологічного процесу на 250-тонній мартенівській печі одного з Донбаських металургійних заводів за умовами технологічного режиму без- та з введенням кисню в ванну печі, а також результати роботи 300-тонного конвертерного агрегату, у якому активним енергоносієм є лише чистий кисень та екзотермічні реакції у чаші конвертера.

Метою подачі у ванну мартенівської печі чистого кисню була безумовно не можливість мінімізувати відходи. Але цей приклад є природним експериментом для включення до складу зовнішньої енергії E_0 від спалювання природного газу та мазуту, яка зазвичай присутня у цьому виді технологічного процесу, додатковий елемент – кисень, який змінює внутрішню енергію процесу ΔU за рахунок екзотермічних реакцій у ванні. Такий додаток до базової енергії можна вважати за додаткове її джерело E_w^0 .

Тим не менш, вдування кисню прискорює окислення та змінює хімію шлаку та умови створення відходів виробництва. Знижується частка FeO за рахунок збільшення окислення заліза до Fe_2O_3 киснем, що вводиться. Вихід шлаку, наприклад, для 250-тонної печі знижується з 150–200 кг/тону сировини до 120–130 кг/т за плавку і залежить від витрати кисню, складу шихти, температури, кількості руди і режиму продування, зокрема, у виключенні з процесів окислення компонентів сировини (P, Si, Mn, C) за рахунок кисню кислої руди ($Fe_2O_3 \rightarrow FeO$) і зміни їх на пряме окислення цих компонентів. При витраті кисню $20 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{год})$ зниження шлаку становить приблизно 10–15%, при $50 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \text{ч})$ – до 25%. Основний фактор – зниження потреби в руді та прискорення окислення, що скорочує масу оксидів у шлаку [7].

Методика дослідження. Передбачається контроль 22-х параметрів мартенівської плавки як протягом плавки, так і за результатами повного технологічного циклу:

Аналізу підлягали технологічні карти та тепло-технічні графіки плавки, маршрутні карти, відомості про сировинні матеріали, згідно з ОСТ 14-1-147-86 «Сталеплавильне виробництво. Загальні технічні умови» на період проведення експериментів.

Розрахунку підлягають такі параметри:

– загальна кількість тепла $E_0 + E_w^0$, що бере участь у технологічному процесі, кДж/кг;

– корисна робота A_0 , спрямовану отримання основний товарної продукції, сталі, кДж/кг;

– термодинамічна сила X_0 , відповідальна за одержання товарної продукції, кДж/кг;

– термодинамічна сила X_w , з якою зв'язується утворення відходів, кДж/кг;

– значення узгодженого коефіцієнта λ для технологічного процесу;

– енергія екзотермічних реакцій у ванні печі (конвертері), кДж/кг ($m^3 / m \cdot c$);

– поточні значення загальної ентропії ΔS для технологічного процесу, як сумарна зміна нерівноважного стану в системі за час процесу виплавки сталі. Вона відображає втрати та перерозподіл енергії у вигляді тепла, газів та незворотних процесів, у тому числі:

– зміна ентропії (Δ), пов'язана з передачею тепла від джерела (факела, екзотермічних реакцій) до ванни, кДж/К;

– зміна ентропії у додаткових хімічних реакціях ($\Delta S_{\text{газ}}$), пов'язаних з утворенням газів (СО, СО₂) при окисленні вуглецю та домішок, кДж/К. Ентропія хімічних реакцій визначалася, як сума ентропії продуктів за мінусом ентропії реагентів, $\Delta S = \sum n_i S_i$;

– зміна ентропії і незворотності ($\Delta S_i > 0$), як у внутрішньої генерації, так і ентропії через незворотні процеси (тертя, турбулентність, теплові втрати), що вказують на втрату корисної енергії, яка розсіюється в системі, кДж/К;

– швидкість зміни ентропії ($\frac{dS}{dt}$), Дж/(К·с);

– коефіцієнт якості сталі, КЯС (частки од.).

Ці величини разом показують, як енергія процесу перетворюється на корисну роботу і відходи, причому в мартенівському процесі ці значення вище через більшу тривалість, а в конвертерному – нижче, але з більшою інтенсивністю.

У хронологічному порядку було досліджено 9 плавок із відхиленнями за теплотехнічними параметрами від технологічних завдань на плавку.

Відхилення стосувалися зміни теплового режиму печі або конвертера у бік перевищення кількості енергоносія, що вводиться в межах $\pm(5 \div 13)\%$ від номінальних значень, а також змін якісних або кількісних показників матеріального потоку (сировини). Аналізу підлягали плавки з випадковими відхиленнями до 10% по тоннажу брухту, що завантажується і заливається чавун, які не порушували допустимих меж за потужністю печі. Кислотність шлаку в контрольних плавках утримувалася лише на рівні $\frac{CaO}{SiO_2} = 0,55 - 0,85$. Цільові температурні режими досягалися зміною подачі теплоносія (газ) та кисню в піч. Якість сталі для конкретних плавок визначалася за коефіцієнтом якості сталі, описаного в роботі [7], таким чином:

$$\Lambda = \frac{\sigma_s \delta_s}{\sigma_n \delta_n} [1 - \pi(S + P)]$$

де: π – коефіцієнт впливу домішок (0,1–0,5); σ_s – опір на розрив, МПа (370–490 для вуглецевих сталей); δ_s – відносне подовження (%) при розтягванні зразка (не менше 20% для вуглецевих сталей); σ_n і δ_n – нормативні показники (370–490 МПа і трохи більше 20% відповідно, для вуглецевих сталей); S і P – масові частки (%) хімічних елементів (сірки та фосфору), які максимально негативно впливають на якість сталі.

Вихідні дані до розрахунку представлені у табл. 1.

Результати дослідження зображені на рис. 1 у вигляді графіків залежності зміни ентропії $\Delta S = f(E_0, E_w)$ в порівнянні з графіком зміни якості результуючого продукту – сталі $\Lambda = \varphi(E_0, E_w)$, який оцінювався за загальним відхиленням параметрів хімічного складу від нормативних значень згідно з ГОСТ 380-2005 «Сталь вуглецева звичайної якості».

Залежності, отримані експериментально-розрахунковим шляхом мають деяку точку перегину «а» (аналогічні точки є і у інших залежностей в системі), на яку завжди можна порахувати значення параметра $k = E_w / E_0$, розуміючи під цим значенням деяку сукупність термодинамічних параметрів, здатних забезпечити подолання принципу термодинамічного двоєдності, зокрема, умови $k \approx 0,62$. У технологічному процесі, що протікає у ванні мартенівської печі, якщо туди подається додаткове опосередковане джерело зовнішньої енергії, зміна ентропії всієї системи, що приведена до базової енергії, при невеликих значеннях $\Delta E_w \approx 1 \cdot 10^4$ кДж/кг зменшується від $0,81 \frac{1}{K}$ до $0,68 \frac{1}{K}$, тим самим показуючи здібності системи до більшої організованості, і зокрема, продувка заснована на тому, що окислювальні процеси у ванні пов'язані тільки із зовнішнім киснем, а природна мінімізація відходів обумовлена зниженням подачі у ванну печі сирової кислоти руди. Однак, після певної межі, зі зростанням $\Delta E_w > 0,968 \cdot 10^4$ кДж/кг можна бачити суттєве зростання зміни ентропії у бік її різкого збільшення від $0,67 \frac{1}{K}$ до $0,89 \frac{1}{K}$, що свідчить про появу в системі дії, спрямованої на дезорганізацію технологічного процесу. Про це говорить, зокрема, різке зниження активності окисних екзотермічних реакцій (див. рис. 1) з подальшим обов'язковим зниженням якості основної продукції – сталі.

Подібні процеси можливі і в конвертерній чаші, якщо на вході суттєво змінити режим подачі кисню. Якість металу в цьому випадку також знижуватиметься. Тільки в конвертері при цьому не стоїть завдання мінімізації відходів – вони в такому режимі тільки зростають за рахунок перерозподілу компонентів вихідної сировини між відомими нам двома частинами.

Таблиця 1

Вихідні дані та результати промислового експерименту в умовах мартенівського виробництва з продувкою ванни киснем та для киснево-конвертерного виробництва

Вихідний параметр	Мартенівська піч		Киснево-конвертерний Агрегат
	без продування киснем	з продуванням киснем	
Потужність, т	250	250	200
Температура ванни,	~1700 К	~1750 К (зріст на 50–100 К)	~1700 К
Час плавки	8 годин	6 годин	0.5 години (30 хвилин)
Витрата палива, кг/т	130 ± 20,0	90 ± 30,0	20 ± 7,0
E_0 , кДж/кг	$(3,0^{+1,3}_{-0,5}) \cdot 10^4$	$(2,1^{+0,65}_{-0,45}) \cdot 10^4$	$(1,1^{+0,55}_{-0,34}) \cdot 10^4$
Теплота процесу, Дж	$(1,3^{+0,6}_{-0,5}) \cdot 10^{12}$	$(1,0 \pm 0,54) \cdot 10^{12}$	$(\cdot 10^{11})$
Витрата кисню м ³ /(т·год),	Відсутня	20 ± 7,7	50 ⁺²⁷ ₋₁₅
Корисна робота, A_0 , кДж/кг	1100 ⁺²⁰⁰ ₋₂₅₀	1300 ⁺⁵⁰⁰ ₋₂₅₀	1950 ⁺⁵⁵⁰ ₋₃₃₀
Матеріальний потік J_0 , кг/(кг·ч)	0,15 ± 0,04	0,18 ± 0,033	1,79 ^{+0,10} _{-0,25}
Матеріальний потік J_w , кг/(кг·ч)	0,029 ^{+0,011} _{-0,005}	0,025 ^{+0,009} _{-0,011}	0,11 ^{+0,08} _{-0,03}
Термодинамічна сила X_0 , кДж/кг	2,3 ^{+0,54} _{-0,35}	3,0 ^{+0,49} _{-0,25}	3,5 ^{+0,54} _{-0,75}
Термодинамічна сила X_w , кДж/кг	0,8 ± 0,15	1,05 ^{+0,35} _{-0,33}	0,80 ^{+0,11} _{-0,07}
Середня швидкість зміни ентропії ($\frac{dS}{dt}$), Дж/(К·с)	4.86 · 10 ⁴	4.41 · 10 ⁴	8.3 · 10 ⁴
Відходи : шлак, J_w , кг/т	150–200 кг/т	120–160 кг/т (зниження на 10–20%)	80–120 кг/т
- з залишку шлаку	Високий вміст FeO	Більше Fe ₂ O ₃ , менше FeO	Більше Fe ₂ O ₃ , менше FeO
Відходи : газу, м ³ /т	500–600 м ³ /т	400–500 м ³ /т (зниження на 15–25%)	150–200 м ³ /т
- з залишків газів	~80–90% CO, решта CO ₂ , SO ₂	30–50% CO ₂ , менше CO	40–60% CO ₂ , менше CO
Відходи: пил, кг/т	1–2 кг/т (~2–4.5 г/м ³)	5–10 кг/т, зростання у 5–10 разів)	2–5 кг/т, зростання у 5–10 разів)

З цих досліджень можна зробити висновок про практичне існування деякої межі для додаткової енергії, що вводиться в технологічний процес, яка може, не порушуючи цілісності основного процесу, певним чином впливати на ту частину сировинного потоку, з якої в звичайних умовах виходить відхід.

Як другий технологічний процес виберемо технологію випікання хліба в традиційному і сучасному вигляді, коли в якості додаткової енергії виступає модифікована зовнішня енергія E_w^0 . Технологія випікання хліба, ставши масовою для більшості країн світу, постійно змінюється у напрямку сортаменту хлібних виробів та їх якості. Тому основний розвиток технології пов'язаний із цими проблемами, майже ніяк не належить до проблем відходоутворення, яке, втім, для цієї технології не є проблемним,

тому що основні відходи легко утилізуються в інших галузях харчування. Тим не менш, головним і найважливішим відходом залишається теплові втрати, що досягають 58% від зовнішньої енергії, що використовується. І в цьому плані сучасні індукційні та резонансні технології дають переваги у мінімізації втрат тепла.

Методологія та припущення описані вище, відрізняються тим, що дані традиційної випічки засновані на типових хлібопекарських печах (конвекційних або подових) [8]. Для мікрохвильової технології використані дослідження з НВЧ-випічки, де нагрівання відбувається за рахунок діелектричного нагрівання води в тесті [9]. Технологія резонансних частот менш поширена, передбачається використання електромагнітних хвиль на частотах, що відповіда-

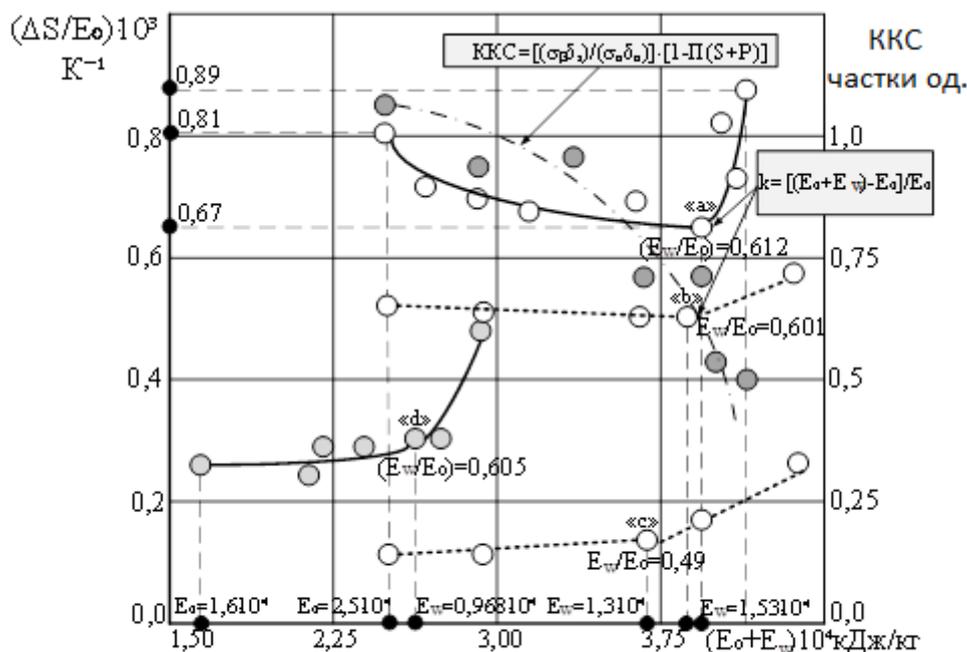


Рис. 1. Динаміка зміни показників мартенівської плавки з продуванням ванни киснем та порівняно з киснево-конвертерним способом отримання сталі. Тут I – мартенівський процес; II – киснево-конвертерний процес

ють резонансним коливанням молекул води (наприклад, 2,45 ГГц, як у НВЧ, але з оптимізацією) [10]. Дані частково екстрапольовані. Вихідні дані зведено в таблицю 2.

Зниження відходів у технології використання резонансних частот пов'язане з зниженням теплових втрат, пов'язаних з точковим нагріванням компонентів тіста і рівномірним розподілом тепла (енергії), а також із оптимізацією технологічного процесу та більш ефективним використанням вихідної сировини.

Технологія резонансної обробки тіста дозволила знизити матеріальні відходи на 37–45%, а теплові втрати – на 54,1%. Застосована зовнішня резонансна енергія електромагнітних хвиль, налаштованих на частоти, що відповідають резонансним коливанням молекул води в тісті (наприклад, 2,45 ГГц) і магнетроном, що випускаються. Результат її впливу – прискорена та цілеспрямована обробка тіста за рахунок діелектричного ефекту з різким зниженням теплових втрат за рахунок точкового впливу енергії електромагнітних хвиль на резонансних частотах для вибіркового нагрівання молекул води в тісті, з мінімізацією нагрівання навколишнього середовища.

У результаті промислового експерименту (рис. 2) не вдалося отримати достовірних статистичних даних про стан системи у випадку, коли модифікована енергія могла б скласти величину в межах $E_0^w / E_0 = 1,62$, (тут E_0^w – сумарна енергія, що подається) що відповідало б нашим припущенням. В даному випадку (див. рис. 2) це співвідношення могло досягнути величини $E_0^w / E_0 = 1350 / 2050 = 0,62$. При цьому зміна

ентропії, тобто ступінь неорганізованості системи, що передбачає як отримання товарної продукції, так і мінімізацію відходів за рахунок модифікованої енергії $E_0^w > E_0$ мало тенденцію до зниження від $\Delta S / E_0 = 8,3$ до $\Delta S / E_0 = 5,1$.

Фактичні значення модифікованої енергії, здатні як до виробництва товарної продукції, так і до мінімізації відходів виявилися здатними до позитивного результату. Однак, навіть оціночні розрахунки показують, що при збільшенні кількості модифікованої енергії, що подається в систему до $E_0^w = 1750$ кДж/кг дозволило б знизити зростання ентропії до $\Delta S / E_0 = +2,3$ що дуже істотно. При цьому теплові втрати в системі могли б знизитися від нинішніх значень при подовій випічці $\Delta Q_m / E_0 = 0,595$ до можливих $\Delta Q_m / E_0 = 0,340$, що дало б економію теплових втрат у розмірі не менше $0,595 \cdot 2050 - 0,340 \cdot 1350 = 760$ кДж/кг, або 62% до існуючого у традиційній випічці хліба.

Звернімо увагу на динаміку складових термодинамічних сил, які за таких параметрів відповідали за виробництво, власне, хліба – $J_0 X_0$ та одержання промислових відходів – $J_w X_w$ (див. рис. 2, б). Застосування модифікованих джерел зовнішньої енергії, в даному випадку, індукційної та резонансної, дозволило перерозподілити термодинамічні сили та матеріальні потоки, що відповідають за отримання товарної продукції та відходів, відповідно, таким чином, щоб збільшилася їхня друга складова майже в 2 рази, при зменшенні першої складової на 57%. При цьому цікавим є співвідношення $(J_0 X_0)^{pes} / (J_0 X_0)^{nod} = \frac{22,8}{37,5} = 0,62$, та співвідношення

Таблиця 2

Вихідні дані для досліджень стійкості системи для технології випікання хліба у традиційній технології та в технологіях з модифікованими джерелами енергії

Параметр	Традиційна випічка	Мікрохвильова технологія	Технології резонансних частот
Продуктивність, т/доба	10	10	10
Температура процесу, °C	220–250	100–120	110–130
Тривалість випічки, год	0,66	0,166	0,133
Витрата палива, ел. Енергії	50 кг/т сировини	0.42 кВт·год/кг Сировини	0,33 кВтг/кг Сировина
Зовнішня енергія, E_0 кДж/кг сировини	$E_0 = 20\ 5\ 0$	$E_0^w = 15\ 4\ 0$	$E_0^w = 13\ 1\ 0$
Теплота процесу, кДж	$2.8 \cdot 10^7$	$2.1 \cdot 10^7$	$1.82 \cdot 10^7$
Корисна робота, A_0 кДж/кг сировини	800	600	550
Матеріальний потік J_0 , кг/(кг сировини · год)	0.029	0.029	0.029
Матеріальний потік J_w , кг/(кг сировини · год)	0.004	0.003	0.0025
Термодинамічна сила X_0 , кДж/кг	1200	1000	900
Термодинамічна сила X_w , кДж/кг	120	150	2 20
Швидкість змін ентропії (dS/dt), до Дж/(К·с)	$1.74 \cdot 10^2$	$1.39 \cdot 10^2$	$1.16 \cdot 10^2$
ВІДХОДИ, кг/кг сировини (% зниження порівняно з подовою), в т.ч. ч.:			
–зола	0,11	0,06 (36,3%)	0,038 (65,4%)
–цвіль	0,05	0,03 (40%)	0,02 (60%)
–пригорілі частини	0,01	0,005 (50%)	0,003 (70%)
–борошно та крихти	0,02	0,01 (50%)	0,005 (75%)
	0,03	0,015 (50%)	0,01 (67%)
ТЕПЛОВІ ВТРАТИ, Q_m кДж/кг, (% зниження порівняно з подовим), в т.ч.:			
–заміс	1200	900 (25%)	550 (45,8%)
–ферментація	50	40 (4,4%)	35 (6,4%)
–пропікання	150	100 (11,1%)	70 (12,7%)
–охолодження	900	700 (77,8%)	490 (89,1%)
	100	60 (66,5%)	35 (6,4%)
Інтегральний показник якості [11]	1.1	1.05	1.0 5

$(J_w X_w)^{pez} / (J_w X_w)^{nod} = \frac{0,67}{0,41} = 1,62$. Вони знову при-
водять нас, але вже як експериментальні, до відо-
мих за минулими дослідженнями значень [12], але
тепер вони відносяться вже не до зовнішньої моди-
фікованої енергії, а до співвідношення наведених
форм корисної роботи, пов'язаної з виробництвом
товарної продукції та перетворенням тієї частини
сировини, яка раніше йшла у відхід, зберігаючи цю
 $k = 0,62$ та пропорцію $1/k = 1,62$.

Недостатність зовнішньої додаткової енергії не
дозволяє запустити мінімізаційні процеси управління
відходами всередині виробничої системи. А надлишок
цієї енергії (понад 0,62) здатний привести виробничу
систему зі стійкого стану в стан близький до хаосу, що
виробничою мовою означає припинення виробництва
запланованої товарної продукції, отримання явного
браку, і все це при тому, що основне завдання залу-
чення додаткової енергії для переробки сировини, що
раніше траплялося у відхід – не здійснюється.

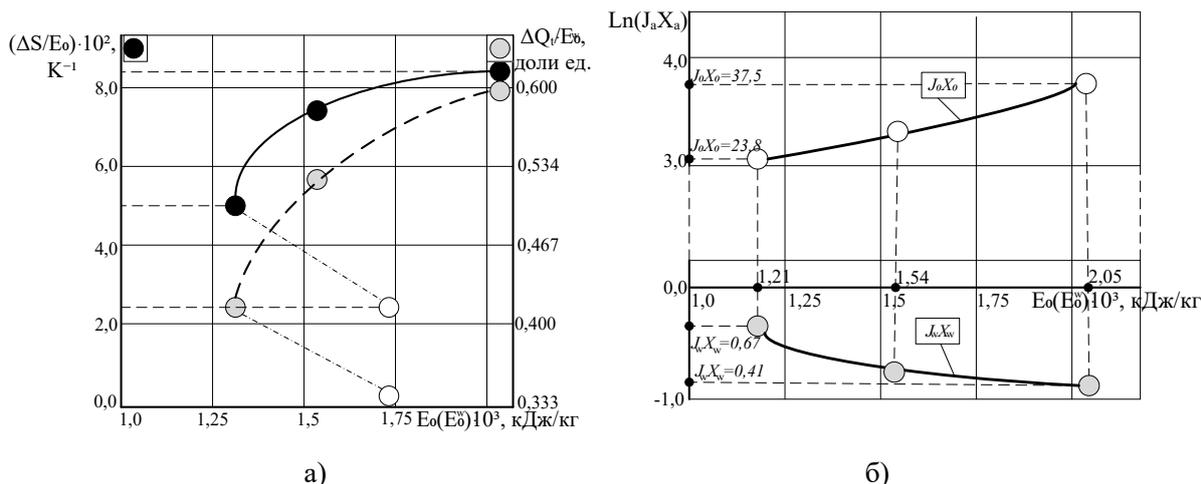


Рис. 2. Динаміка зміни показників у технології випікання хліба, послідовно, подовим способом, індукційним способом, із застосуванням резонансних частотних джерел енергії: а) – зміна ентропії, пов'язана із зміною джерела зовнішньої енергії; б) – зміна взаємодіючих термодинамічних сил і потоків, відповідальних отримання товарної продукції $J_0 X_0$ і на відході $J_w X_w$

Головні висновки. Аргументованість представлених закономірностей, як доказ, потребує подальших індивідуальних досліджень, та поки може відноситися тільки до окремих груп прикладних технологій, зокрема, зв'язаних з деякими аспектами систем, орієнтованих на свої виробничі завдання. Й дещо інший висновок, який, на наш погляд, є не менш актуальним та перспективним для людини, що створює технології 5.0. Подолання принципу термодинамічної двоєдності з метою мінімізації відходів і досягнення максимально можливої продуктивності, в якому проявляються властивості, близькі до властивостей «золотого перетину» Фібоначчі.

Незважаючи на їх випадкову чисельну збіжність, це може бути сигналом про можливе прагнення штучних технологічних процесів, створених людським розумом, до їх гармонійного співіснування з Природою за допомогою подальшого розвитку, без порушення ландшафтів, гідрологічних деформацій, атмосферних аномалій. Як форма співіснування природного та штучного світів на планеті, це раціональне використання природних ресурсів при мінімальному техногенному впливі на поверхню планети. Це основа термодинамічного оптимізму на планеті, коли Природа і людина знаходять умови для термодинамічно узгодженого співіснування.

Література

1. Волошин В. С. Мінімізація промислових відходів у технологічних процесах, термодинамічний підхід. Екологічні науки, № 6(57), 2024. С. 25-30.
2. Волошин В. С., Бурко В. А. Відповідність принципу термодинамічної двоєдності, як причини відходоутворення. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2024. Серія: Технічні науки Вип. 49. Т. 2. С. 86-93.
3. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ-Маріуполь, СПД Самченко. 2024. 88 с.
4. Luis A. Morales-Sánchez, L. A., Moreno-García J. A., Mora-González J. A. An Experimental Study of the Empirical Identification Method to Infer an Unknown System Transfer Function. MDPI (Sensors), 2022. 140 p.
5. Bogdanski K, Best M. C. A new structure for non-linear black-box system identification using the extended Kalman filter. SAGE Publications (Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering), 2017. P.223-232.
6. Jewkes J., Sawers D., Stillerman R. Oxygen Steel-Making. Palgrave Macmillan, 1969. P.471-555.
7. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2015. 704 p.
8. Purlis, E. Baking Process Design and Energy Efficiency. Food Research International, Vol. 43, Issue 7, Amsterdam: Elsevier. 2010, P. 1861-1869.
9. Sumnu, G., Sahin, S. Microwave Baking: Principles and Applications. In: Advances in Food Science and Technology. New York: Wiley, 2019. 320 p.
10. Therdthai, N., Zhou, W. Recent Advances in Bread Baking Technology. Trends in Food Science and Technology, Vol. 20, Issue 2, Amsterdam: Elsevier. 2009, P. 89-97.
11. Campbell G. M. Baking Quality – an overview. Elsevier (ScienceDirect). Amsterdam, 2005. 421 p.
12. Волошин В. С. Чи варто шукати «золоті пропорції» Фібоначчі у процесах утворення відходів. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 36. наук. праць. Вип. 44. Дніпро, 2022. С. 43-53.

Дата першого надходження рукопису до видання: 03.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 504.06:628.5:614.84

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.18>

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ВПЛИВУ СКЛАДАЛЬНО-ЗВАРЮВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА НА СТАН АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Золотько О.В., Войтенко Ю.В., Русакова Т.І., Долженкова О.В., Назаренко Д.Ю.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро
zltkelena@gmail.com, Juliya.voy.1983@gmail.com, rusakovati1977@gmail.com,
dolena2017@gmail.com, diananazarenko69@gmail.com

Розглянуто основні показники екологічної безпеки діяльності складально-зварювального виробництва підприємства металообробки м. Дніпра, які характеризують рівень його впливу на атмосферне повітря, масштаби утворення шкідливих речовин та потенційні ризики для здоров'я населення прилеглих територій. Проведено аналіз технологічних процесів ручного, напівавтоматичного та автоматичного зварювання з урахуванням матеріальних балансів, складу електродів і флюсів. Це дозволило визначити частку шкідливих речовин, які виділяються в атмосферу: від 0,5 % для автоматичного зварювання під шаром флюсу до 3 % для ручного дугового. Встановлено, що підприємство металокопункцій належить до IV класу небезпеки із нормованою санітарно-захисною зоною 100 м, при цьому найближча житлова забудова розташована на відстані понад 370 м від джерел викидів. Визначено, що для організованих джерел забруднення основними поллютантами є сполуки заліза, мангану, діоксид кремнію, фториди, оксиди азоту та вуглецю. За результатами розрахунків розсіювання встановлено, що максимальні приземні концентрації шкідливих речовин не перевищують гранично допустимі норми. Водночас з урахуванням фонових значень спостерігається перевищення ГДКс.д.: у 4,26 рази по залізу, у 1,016 – по суспендованих твердих частках та у 1,101 – по чадному газу. Зони впливу забруднювачів складають: для заліза – 566 м, суспендованих часток – 242 м, окису вуглецю – 353 м, фторидів – 2180 м. На основі розрахунку парціальних індексів забруднення атмосфери визначено комплексний індекс забруднення (КІЗА) = 6,99, що відповідає стану підвищеного забруднення повітря. Отримані результати свідчать про значний внесок зварювальних процесів у формування локального екологічного навантаження. Запропоновано підхід до оцінки рівня впливу підприємства на якість повітря з використанням комплексних показників, який може бути застосований для планування природоохоронних заходів, оптимізації технологічних режимів та зменшення ризиків для здоров'я населення прилеглих територій. *Ключові слова:* показники екологічної безпеки, екологічний контроль, складально-зварювальне виробництво, специфічні домішки, індекс забруднення атмосфери, повітря робочої зони.

Analysis of indicators of environmental safety of the impact on atmospheric air of the activities of assembly and welding production of a metalworking enterprise. Zolotko O., Voitenko Yu., Rusakova T., Dolzhenkova O., Nazarenko D.

The main indicators of environmental safety of the assembly and welding production activities of a metalworking enterprise in Dnipro have been examined. These indicators characterize the level of its impact on ambient air, the scale of harmful substance formation, and the potential health risks to the population of adjacent areas. An analysis of the technological processes of manual, semi-automatic, and automatic welding was carried out considering material balances and the composition of electrodes and fluxes. This made it possible to determine the share of harmful substances released into the atmosphere: from 0.5% for automatic submerged arc welding to 3% for manual arc welding. It was established that the metal structures enterprise belongs to hazard class IV with a regulated sanitary protection zone of 100 m, while the nearest residential area is located more than 370 m from the emission sources. For organized emission sources, the main pollutants are iron and manganese compounds, silicon dioxide, fluorides, nitrogen oxides, and carbon oxides. According to the results of dispersion modeling, the maximum ground-level concentrations of pollutants do not exceed the maximum permissible limits. However, when background concentrations are taken into account, exceedances of MPC (average daily) were observed: by 4.26 times for iron, by 1.016 times for suspended particulates and by 1.101 times for carbon monoxide. The zones of influence of pollutants were determined as follows: iron – 566 m, suspended particulates – 242 m, carbon monoxide – 353 m, fluorides – 2180 m. Based on the calculation of partial atmospheric pollution indices, the composite atmospheric pollution index (CAPI) was found to be 6.99, which corresponds to a moderately increased level of air pollution. The obtained results indicate a significant contribution of welding processes to the formation of local environmental loads. A methodological approach to assessing the enterprise's impact on air quality using integrated indicators is proposed. This approach can be applied for environmental protection planning, optimization of technological regimes, and reducing health risks for the population of nearby areas. *Key words:* environmental safety indicators, environmental monitoring, assembly and welding production, specific impurities, atmospheric pollution index, workplace air.

Постановка проблеми. Високий рівень антропогенного навантаження на навколишнє природне середовище в промислових регіонах України призвів до критичного стану забруднення атмосферного повітря у багатьох містах. За окремими показниками

спостерігається стійке перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин [1].

Екологічна безпека діяльності промислового підприємства визначається його спроможністю забезпечувати екологічно відповідальне функціонування,

запобігати шкідливому впливу на довкілля та дотримуватися чинних екологічних нормативів і стандартів.

Показники екологічної безпеки відображають рівень техногенного навантаження підприємства на навколишнє середовище та характеризують його здатність мінімізувати негативні наслідки виробничої діяльності.

Актуальність дослідження. Актуальність аналізу показників екологічної безпеки складально-зварювального виробництва підприємства металообробки у м. Дніпро зумовлена значним техногенним навантаженням на атмосферне повітря. Це пов'язано з наявністю у його викидах специфічних забруднюючих речовин, зокрема оксидів металів, оксидів азоту, оксиду вуглецю та фторидів, які суттєво впливають на якість повітря в зоні розташування підприємства. У зв'язку з цим виникає потреба в оцінюванні екологічної безпеки таких об'єктів та визначенні ступеня їх впливу на навколишнє середовище. Особливого значення це набуває для міст із розвинутою системою машинобудівних і металообробних підприємств, де забруднення має кумулятивний характер. Проведення аналізу показників екологічної безпеки дає змогу обґрунтувати напрями підвищення екологічної ефективності виробництва, зменшення техногенного навантаження на атмосферне повітря та забезпечення відповідності діяльності підприємства вимогам чинного природоохоронного законодавства України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. На сучасному етапі визначення показників екологічної безпеки діяльності промислових підприємств є складною багатofакторною задачею, що потребує урахування різних аспектів. У більшості проведених досліджень стан окремих компонентів навколишнього середовища оцінюється за рівнем пріоритетних забруднювачів, тоді як наявність специфічних домішок, характерних для певних виробництв, часто залишається поза увагою. Такі речовини можуть відігравати визначальну роль у формуванні фонових концентрацій шкідливих домішок у промислових і житлових зонах. Визначення меж їх впливу має стати основою для розроблення обґрунтованих природоохоронних заходів і встановлення нормативів щодо допустимих викидів на підприємствах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [2] розкрито теоретичні аспекти управління екологічною безпекою та механізми екологічного менеджменту підприємств, наголошено на необхідності системного підходу й взаємодії суб'єктів екологічної політики. Ці положення є важливими для формування методологічної основи дослідження, хоча автор обмежується теоретичним рівнем узагальнення без наведення прикладних прикладів для окремих галузей. У дослідженнях [3] розглянуто теоретичні аспекти визначення поняття «екологічна безпека підприємства» і виділено основні критерії її оцінювання. Ці результати доцільно використуву-

вати для обґрунтування системи показників екологічної безпеки, однак відсутність емпіричної перевірки обмежує практичне застосування методики. Авторка роботи [4] розробила наукові основи управління екологічною безпекою промислових комплексів вуглевидобувних підприємств, запропонувавши методичні підходи до оцінювання ризиків. Водночас галузева специфіка роботи потребує адаптації для металообробних і зварювальних виробництв.

На практиці для оцінювання екологічної безпеки діяльності підприємства найчастіше застосовують інтегральні показники, які враховують як кількісні, так і якісні аспекти впливу суб'єкта господарювання на довкілля [3, 4]. До таких показників належать клас небезпеки підприємства, комплексні індекси забруднення, динаміка екологічних параметрів, коефіцієнти екологічного ризику, рівень екологічної стабільності підприємства тощо.

Практичну спрямованість має дослідження [5], у якому проведено оцінку рівня забруднення атмосферного повітря м. Запоріжжя з використанням індексів забруднення. Результати відображають загальні міські тенденції, проте не дозволяють ідентифікувати внесок окремих технологічних процесів. У роботі [6] здійснено аналіз стану атмосферного повітря у малих містах Харківської області, визначено роль транспорту та підприємств. Незважаючи на регіональну актуальність, у дослідженні бракує деталізації складу викидів за видами промислових джерел. Авторами роботи [7] проведено гігієнічну оцінку методів зварювання та зварювальних матеріалів щодо утворення аерозолів і викидів у робочій зоні. Визначено склад шкідливих компонентів (оксиди металів, фтористі сполуки, озон, оксиди азоту) та їхню залежність від типу електрода і режиму зварювання. Результати важливі для оцінки професійного ризику та вдосконалення вентиляційних систем. Водночас дослідження зосереджене переважно на умовах робочого середовища, без урахування впливу зварювальних викидів на атмосферне повітря прилеглих територій. В дослідженні [8] узагальнено європейські підходи до екологічної безпеки сталих міст, розглянуто інтегровані системи моніторингу та управління ризиками. Дослідження має загальний характер, не аналізує локальний вплив промислових процесів, не містить розрахунків забруднення атмосфери чи оцінки ризику від зварювальних викидів. В роботі [9] наведено порівняльний аналіз методів визначення рівня забруднення атмосферного повітря, зокрема, індексних, статистичних, модельних, що є важливим для вибору адекватної методики моніторингу. Разом із тим автори не розглянули адаптацію цих методів до специфіки зварювальних процесів. Сучасні підходи до прогнозного моделювання забруднення атмосферного повітря розглянуто у роботі [10]. Автори запропонували модель вибору стратегії зменшення забруднення на основі даних прогнозного аналізу, але обмеження роботи полягає

у відсутності адаптації до локальних технологічних джерел. В роботі [11] запропоновано моделювання інтегрованого показника загального рівня екологічної безпеки підприємства, але не деталізовано специфічні домішки та локальні джерела. Автори роботи [12] розробили класифікацію якості повітря за комплексними індексами, проте без прикладної реалізації для конкретних промислових цехів. Методика міжнародного Air Quality Health Index [13] надає стандартизовані підходи до оцінки ризику для здоров'я населення, але не враховує локальні технологічні джерела забруднення. В роботі [14] узагальнено методи оцінки техногенного впливу на довкілля, проте без деталізації специфіки зварювальних і металообробних процесів.

У розвинених країнах методика визначення індексів якості атмосферного повітря має певні відмінності [13, 14]:

1. Індекс якості атмосферного повітря (Air Quality Index – AQI, США) визначається Агентством з охорони навколишнього середовища та враховує концентрації O_3 , завислих речовин, CO , SO_2 і NO_2 .

2. Індекс здоров'я за якістю атмосферного повітря (Air Quality Health Index – AQHI, Канада) розраховується на основі вмісту O_3 , завислих речовин та NO_2 . Значення AQHI варіює від 1 до 10 і відповідає шкалі ризику для здоров'я: 1–3 – низький, 4–6 – помірний, 7–10 – високий, >10 – дуже високий.

3. Індекс АТМО (Франція) враховує концентрації SO_2 , NO_2 , O_3 та завислих речовин і поділяє стан повітря на п'ять категорій: «дуже добрий», «добрий», «середній», «посередній» та «поганий».

4. Індекс якості повітря у Великобританії приймає значення від 1 до 10; рівні забруднення визначаються так: 1–3 – низький, 4–6 – помірний, 7–9 – високий, 10 – дуже високий. Враховуються концентрації O_3 , NO_2 , SO_2 та завислих речовин.

5. BELATMO (Бельгія) розраховується за вмістом O_3 , NO_2 , SO_2 і завислих речовин та варіює від 1 (відмінна якість) до 10 (дуже погана).

6. Індекс забруднення повітря API (Китай) включає SO_2 , NO_2 та ТЧ10; визначається компонент з найвищим рівнем забруднення. Категорії якості: 0–50 – відмінна, 51–100 – добра, 101–150 – незначно забруднене, 151–200 – слабо забруднене, 201–250 – середньо забруднене, 251–300 – середньо-сильно забруднене, >300 – сильно забруднене повітря.

Таким чином, наявні дослідження охоплюють широкий спектр проблем екологічної безпеки та моніторингу атмосферного повітря, проте залишаються недостатньо розробленими питання, пов'язані з локальними технологічними джерелами забруднення. Зокрема, бракує робіт, які б поєднували індексну оцінку забруднення з розрахунками приземних концентрацій у межах складально-зварювальних цехів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена

стаття. У даній роботі проведено оцінку показників екологічної безпеки впливу складально-зварювального виробництва підприємства металообробки у м. Дніпро на атмосферне повітря. Особлива увага приділена наявності специфічних домішок у викидах підприємства та їхньому впливу на екологічний стан повітря у зоні розташування виробничого об'єкта.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у розробці комплексного підходу до оцінки показників екологічної безпеки впливу складально-зварювального виробництва на атмосферне повітря. У роботі поєднано розрахунок приземних концентрацій специфічних домішок у викидах підприємства, визначення зон їх впливу та інтегровану оцінку стану повітря за допомогою індексів забруднення. Такий підхід дозволяє більш точно оцінити локальний екологічний ризик та формує наукову основу для розробки природоохоронних заходів і планування систем екологічного контролю на підприємствах металообробної галузі.

Викладення основного матеріалу. До основних показників екологічної безпеки діяльності промислових підприємств належать обсяги викидів забруднюючих речовин у повітря та скидів у водойми, кількість утворених відходів і ефективність їх утилізації, а також використання ресурсозберігаючих технологій.

Додатковими показниками є ефективність природоохоронних заходів, комплексні індекси забруднення, відповідність санітарно-захисної зони класу небезпеки підприємства, динаміка зміни екологічних показників та рівень екологічної відповідальності підприємства.

Виробничий процес досліджуваного підприємства металообробки у м. Дніпро включає механічну обробку металу: різання, складання, зварювання, обробку поверхонь та нанесення антикорозійних покриттів. Основним джерелом забруднення атмосферного повітря є складально-зварювальне виробництво. На підприємстві функціонують два складально-зварювальні цехи, де здійснюють різні види зварювання: автоматичне під шаром флюсу, напівавтоматичне у середовищі інертних газів та ручне дугове зварювання електродами. Найбільш екологічно безпечним серед них є процес автоматичного зварювання під шаром флюсу, під час якого в атмосфері надходить 0,0278 т/рік забруднюючих речовин. Для порівняння, при напівавтоматичному зварюванні в середовищі інертних газів обсяг викидів становить 0,473 т/рік. Матеріальний баланс процесу ручного дугового зварювання штучними електродами наведено на рисунку 1.

Проведений аналіз матеріальних балансів різних технологічних процесів зварювання показав, що частка шкідливих речовин, які потрапляють в атмосферу, є незначною. Вона становить від 0,5 % для автоматичного зварювання під шаром флюсу до 3 % для ручного дугового зварювання від загальної маси використаних матеріалів.

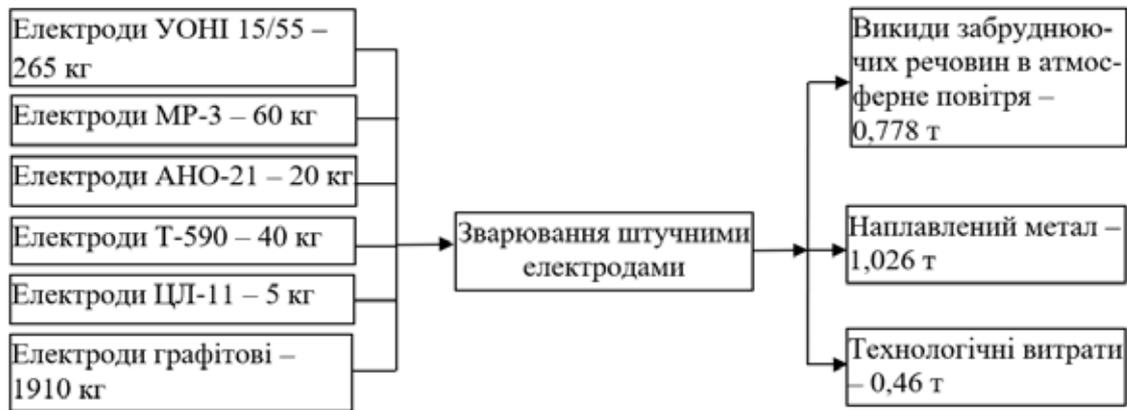


Рис. 1. Матеріальний баланс ручного зварювання штучними електродами

Із 30 організованих джерел забруднення атмосферного повітря підприємства чотирнадцять належать до складально-зварювальних цехів. У процесі зварювання в робочу зону виробничих приміщень виділяються сполуки заліза та мангану, а також діоксид кремнію у вигляді твердих частинок, недиференційованих за складом. Крім того, утворюються фтор і його газоподібні сполуки (у перерахунку на фтористий водень), а також оксиди азоту та вуглецю.

Відомо, що вплив зазначених речовин може спричинити розвиток професійних захворювань у зварювальників, зокрема пневмококіозів, коніотуберкульозу, хронічного бронхіту, емфізематозно-бронхітичного синдрому та хронічного ринофаринголарингіту. Ці ж забруднюючі речовини виявляються і у викидах в атмосферу від стаціонарних джерел складально-зварювальних цехів.

Територія заводу розташована у промисловій зоні м. Дніпро та оточена іншими підприємствами: цементний завод, виробництво металевої фурнітури, металургійний комбінат. Ступінь обмеження забруднення залежить від стану атмосферного повітря району. За даними Дніпропетровського регіонального центру з гідрометеорології, фонові концентрації 29 забруднюючих речовин охоплюють широкий спектр полютантів. До них належать пріоритетні домішки – пил, оксиди та діоксиди азоту і сірки, оксид вуглецю, аміак. А також специфічні для складально-зварювального виробництва речовини –

залізо, манган, нікель, свинець, хром, фтор, діоксиди титану та кремнію. Значення фонових концентрацій, які перевищують ГДК, наведені у таблиці 1.

Можна бачити, що серед забруднювальних речовин найбільше перевищення середньодобової ГДК спостерігається для сполук заліза. Ці частки чинять фіброгенний токсичний вплив: при короткочасній дії вони спричиняють подразнення слизових оболонок носа, горла та очей, кашель, а за тривалого впливу накопичуються в легенях і можуть призводити до розвитку сидерозу – форми пневмококіозу, що характеризується задишкою, зниженням працездатності та хронічним кашлем.

У цілому для викидів промислових підприємств, розташованих у зоні дослідження, характерна наявність речовин із вираженими токсичними, подразнювальними, фіброгенними, нейротоксичними та канцерогенними властивостями.

Підприємство перебуває на державному обліку за кількістю фактичних обсягів викидів окремих речовин, що утворюються у складально-зварювальному виробництві. У таблиці 2 наведено значення фактичних обсягів таких викидів. Із неї видно, що під час технологічних процесів складання та зварювання кількість утворюваних речовин перевищує порогові значення від 1,3 разу (для оксиду вуглецю) до 27,3 разу (для сполук заліза).

Одним із показників екологічної безпеки діяльності підприємства є клас небезпеки підприємства

Таблиця 1

Гігієнічні нормативи та фактичні фонові концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі біля підприємства

№	Забруднююча речовина	ГДК (мг/м ³)	Фонова концентрація (мг/м ³)	Кратність перевищення
1	Залізо та його сполуки (у перерахунку на залізо)	0,04	0,16	4
2	Речовини у вигляді суспендованих твердих часток недиференційованих за складом	0,5	0,5003	1,001
3	Оксид вуглецю	5,0	5,5075	1,101

Фактичні викиди забруднюючих речовин зварювального виробництва та їх порогові критерії для взяття на державний облік

№ з/п	Найменування	Фактичний обсяг викидів (т/рік)	Порогові значення потенційних викидів для взяття на держоблік (т/рік)
1	Залізо та його сполуки (у перерахунку на залізо)	2,731	0,1
2	Хром та його сполуки в перерахунку на триоксид хрому	0,07862	0,02
3	Марганець та його сполуки (у перерахунку на діоксид марганцю)	0,1117	0,005
4	Речовини у вигляді суспендованих твердих частинок, недиференційованих за складом	10,00076	3
5	Оксиди азоту (оксид та діоксид азоту) у перерахунку на діоксид азоту	4,885	1
6	Оксид вуглецю	1,9352	1,5
7	Акролеїн	0,00791	0,004
8	Ацетон	0,922	0,5
9	Бутиловий ефір оцтової кислоти (бутилацетат)	3,353	0,3
10	Ксилол	5,0657	0,9
11	Толуол	4,364	0,1

(КНП). Його визначають з урахуванням типу виробництва, кількості та виду небезпечних речовин, імовірності виникнення аварійних ситуацій, рівня впливу на довкілля та відповідності нормативним вимогам. Оцінка КНП необхідна для встановлення екологічних обмежень, вимог до безпеки виробничих процесів і розроблення заходів щодо запобігання аваріям і мінімізації їхніх наслідків [15]. Показник КНП визначено згідно з [15] на основі маси, виду та складу шкідливих речовин, їх середньодобових ГДК і класу небезпеки. За результатами розрахунку підприємство металоконструкцій віднесено до 4 класу небезпеки, для якого встановлено санітарно-захисну зону 100 м. У її межах відсутня житлова забудова та об'єкти соціальної інфраструктури.

Найближчі житлові будинки розташовані на відстані понад 370 м у західному напрямку від джерел викидів, тобто за межами встановленої зони. Детальну оцінку зони впливу підприємства на населення можна здійснити після розрахунку розсіювання шкідливих речовин у повітрі.

Розрахунок розсіювання забруднюючих речовин виконано відповідно до п. 5.21 ОНД-86 із врахуванням маси викидів, значень максимальної разової ГДК речовин та параметра Φ , який залежить від середньої висоти джерела. Результати показали необхідність урахування впливу всіх речовин, що виділяються під час складання та зварювання: сполук заліза, мангану, хрому, діоксиду кремнію, фтору та його газоподібних сполук (у перерахунку на фтористий водень і фтор), а також оксидів азоту та вуглецю. Джерела викидів мають однакову висоту 20 м і розташовані на відстанях, менших за висоту

дефлектора, а також характеризуються близькими масовими та об'ємними витратами газоповітряної суміші, що дає підстави розглядати їх як зосереджене джерело забруднення. Результати наведено на рисунках 2–5 для речовин, фонові концентрації яких перевищують середньодобові ГДК, зокрема, залізо, СО, діоксид кремнію. Вісь абсцисс відображає відстані до джерела у вигляді кратності від значень x_m (відстані від джерела, на якій досягаються значення максимальних приземних концентрацій). Вони становлять: для заліза – $x_m = 80,82$ м, для суспендованих твердих частинок і оксиду вуглецю – $x_m = 106,43$ м.

Слід зазначити, що графіки зміни концентрації шкідливих речовин із відстанню від джерела мають форму класичної симетричної гаусівської кривої. Значення максимальних приземних концентрацій не перевищують середньодобові ГДК, тобто рівень впливу речовин, що виділяються у складально-зварювальному виробництві, є безпечним для здоров'я населення.

Проте з урахуванням фонових концентрацій шкідливих речовин, при додаванні їх значень до отриманих концентрацій, відзначено перевищення ГДК для населених пунктів у 4,26 рази по залізу та його сполукам, у 1,016 разів по суспендованих твердих частках та у 1,101 разів по чадному газу.

Зону впливу кожної речовини на населення прилеглих територій, згідно з методикою ОНД-86, визначають як відстань, на якій концентрація шкідливої речовини зменшується до 0,05 ГДК. За результатами розрахунків, відстані зон впливу становлять: для заліза – 566 м, для суспендованих твердих частинок – 242 м, для оксиду вуглецю – 353 м, для фторидів – 2180 м.

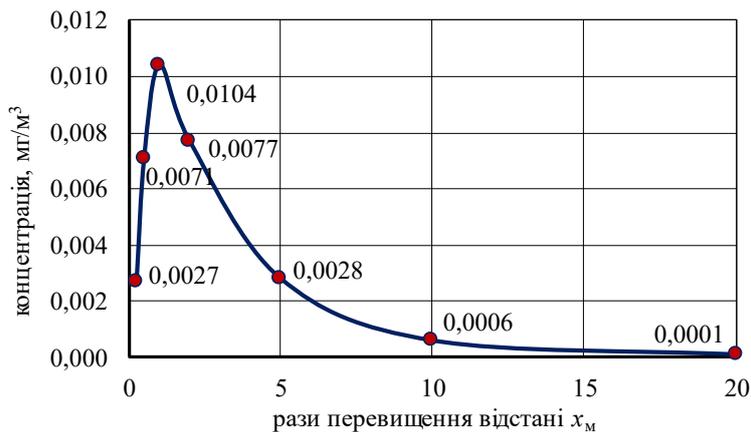


Рис. 2. Приземні концентрації заліза в атмосферному повітрі

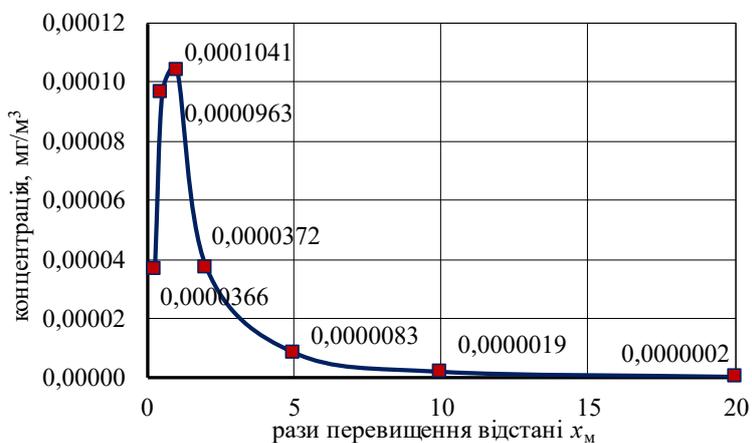


Рис. 3. Приземні концентрації оксиду вуглецю в атмосферному повітрі

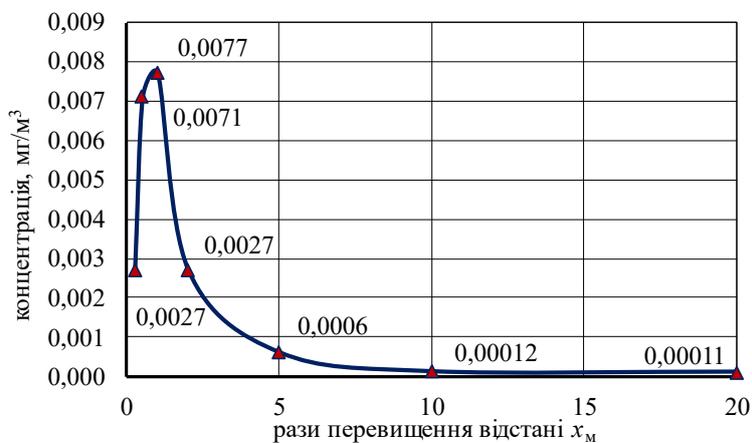


Рис. 4. Приземні концентрації суспендованих твердих частинок (ТЧ) в атмосферному повітрі



Рис. 5. Приземні концентрації фторидів в атмосферному повітрі

Для методичної частини дослідження застосовано загальноприйняті підходи та формули обчислення парціальних і комплексного індексів забруднення атмосфери (КІЗА) прилеглої території, що враховують вплив специфічних домішок складально-зварювального виробництва та фонові концентрації [12] (1).

$$KIZA = \sum_{i=1}^n \left(\frac{C_m + C_\phi}{ГДК_i} \right)^{a_i}, \quad (1)$$

де C_m – розрахована максимальна приземна концентрація шкідливої домішки, мг/м³; C_ϕ – фонові концентрації речовини у місці розташування підприємства, мг/м³; $ГДК_i$ – середньодобова гранично допустима концентрація i -тої забруднюючої речовини, мг/м³; a_i – безрозмірна константа, яка враховує клас небезпеки i -тої речовини.

Дані розрахунків парціальних індексів та комплексного індексу забруднення атмосфери наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Значення парціальних та комплексного індексів забруднення атмосфери (ІЗА) у зоні впливу підприємства

№	Назва речовини	ІЗА
1	Залізо	3,48
2	Манган	0,307
3	Нікель	0,82
4	Хром	0,02
5	Оксиди азоту	0,0667
6	Оксид вуглецю	1,284
7	Тверді частки	1,01
Комплексний індекс забруднення		6,99

Таким чином, розраховане значення комплексного індексу забруднення атмосфери специфічними домішками, що утворюються у складально-зварювальному виробництві, КІЗА = 6,99 ∈ (5,0–7,0),

свідчить про стан підвищеного рівня забруднення атмосферного повітря в районі розташування підприємства.

Результати дослідження свідчать про необхідність посилення контролю за викидами та реалізації природоохоронних заходів.

Головні висновки. В умовах високого антропогенного навантаження на навколишнє середовище в промислових регіонах України аналіз показників екологічної безпеки діяльності підприємств дозволяє оцінити ступінь їх впливу на атмосферне повітря та визначити напрями мінімізації негативного впливу.

До основних показників екологічної безпеки складально-зварювального виробництва підприємства відносяться:

- ÷ обсяги утворених відходів;
- ÷ наявність специфічних домішок у викидах та їх вплив на стан атмосферного повітря;
- ÷ формування зон впливу поллютантів на населення;
- ÷ комплексний індекс забруднення атмосфери.

Проведений аналіз матеріальних балансів ручного, автоматичного та напівавтоматичного зварювання показав, що основними утворюваними відходами є шкідливі речовини, які виділяються у атмосферу та становлять від 0,5 % (автоматичне зварювання під шаром флюсу) до 3 % (ручне дугове зварювання електродами) від загальної маси витрачених матеріалів.

Виділено 13 організованих джерел викидів складально-зварювального виробництва. Основними специфічними домішками, що потрапляють у атмосферу, є: залізо та його сполуки, манган, діоксид кремнію (у вигляді твердих часток), фтор та його газоподібні сполуки (у перерахунку на фтористий водень), оксиди азоту та вуглецю.

Фонові концентрації деяких забруднюючих речовин, особливо заліза та його сполук, перевищують

середньодобові гранично допустимі концентрації (ГДКс.д.) у 1,1–4 рази. За 11 речовинами, що присутні у викидах, підприємство перебуває на державному обліку.

Розрахований клас небезпеки підприємства показав, що воно відноситься до 4 класу небезпеки із нормованою санітарно-захисною зоною 100 м. При цьому найближча житлова забудова розташована на відстані понад 370 м від джерел викидів, що перевищує межі санітарно-захисної зони.

Розрахунок розсіювання основних забруднюючих атмосферу речовин показав, що максимальні приземні концентрації не перевищують ГДКс.д. Однак із врахуванням фонових концентрацій спостерігається перевищення ГДКс.д. у 4,26 рази по залізу та його сполуках, у 1,016 разів по суспендованим твердим часткам та у 1,101 разів по чадному газу. Визначені зони впливу окремих речовин (ОНД-86) складають: для заліза – 566 м, для суспендованих

твердих часток – 242 м, для оксиду вуглецю – 353 м, для фторидів – 2180 м.

Комплексний індекс забруднення атмосфери специфічними домішками складально-зварювального виробництва КІЗА = 6,99 \in (5,0–7,0) відповідає стану підвищеного забруднення атмосфери, що свідчить про потенційний ризик для здоров'я населення прилеглих територій.

Перспективи використання результатів досліджень. Враховуючи високий фоновий рівень забруднення атмосфери на території розташування підприємства, природоохоронні заходи повинні бути спрямовані на зниження концентрацій шкідливих речовин у викидах складально-зварювального виробництва. Це можна досягти за допомогою впровадження ефективних систем вентиляції та пристроїв уловлювання твердих часток і газоподібних домішок, а також шляхом оптимізації технологічних режимів зварювання.

Література

1. Ричак Н.Л., Табачна І.М. Тенденції формування рівня забруднення атмосферного повітря урбанізованого середовища. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 3–4. С. 120–127. URL: https://journals.uran.ua/ludina_dov/article/view/22754 (дата звернення: 12.09.25).
2. Amber A. The essence and mechanism of environmental safety management. *Green, Blue and Digital Economy Journal*. 2023. 4(2). Р. 1–9. URL: <http://baltijapublishing.lv/index.php/gbdej/article/view/2095/2100> (дата звернення: 02.09.25).
3. Артюх-Пасюта О., Мілька А. Теоретичні аспекти визначення екологічної безпеки підприємства. *Економіка та суспільство*. 2021. № 25. С. 44–49. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-25-33>.
4. Луцьова О.В. Наукові основи управління екологічною безпекою промислових комплексів вуглеводобувних підприємств. *Екологічні науки*. 2020. № 1(28). С. 50–59. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.8>
5. Белоконь К.В., Пірогова І.М. Аналіз та оцінка рівня забруднення атмосферного повітря м. Запоріжжя. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету*. 2021. Том 1, № 38. С. 149–158. URL: <https://doi.org/10.31319/2519-2884.38.2021.18>.
6. Некос А.Н., Кравченко О.К. Оцінка стану та динаміки забруднення атмосферного повітря малих міст Харківської області. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 1–2. С. 122–127. URL: https://journals.uran.ua/ludina_dov/article/view/22406 (дата звернення: 18.09.25).
7. Levchenko O., Polukarov Y., Zemlyanska O. Hygienic characteristics of welding methods and welding materials. *Environmental Safety and Natural Resources*. 2025. № 53(1). С. 82–94. URL: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.82-94>
8. Мельникова М.В., Градобоева, Є.С. Аналіз європейського досвіду використання системи екологічної безпеки стало розвинутих міст. *Економічний простір*. 2020. № 163, С. 109–113. <https://doi.org/10.32782/2224-6282/163-19>
9. Доценко Л.В., Демиденко А.С. Порівняльний аналіз методів визначення рівня забруднення атмосферного повітря. *Екологічна безпека*. 2014. Вип. 2. С. 71–74. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekbez_2014_2_14 (дата звернення: 22.09.25).
10. Building a model for choosing a strategy for reducing air pollution based on data predictive analysis / A. Biloshchytskyi et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 3, no. 4 (117). Р. 23–30. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.259323>
11. Radevych T.V., Nochovna Y.O., Samburs'ka N.I. Modelling of the integrated indicator of the general level of environmental safety of the enterprise. *Economic Analysis*. 2017. No. 27(2). Р. 182–191. URL: <https://doi.org/10.35774/econa2017.02.182>
12. Колесник В.Є., Павличенко А.В., Калініна К.Р. Екологічна класифікація якості атмосферного повітря за комплексними індексами його забруднення. *Геотехнічна механіка*. 2017. Вип. 137. С. 156–169. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/158647> (дата звернення: 14.09.25).
13. About the Air Quality Health Index. URL: https://www.canada.ca/en/environment-climate-change/services/air-quality-health-index/about.html#What_is_AQHI (дата звернення: 08.07.2025).
14. Чугай А.В., Сафранов Т.А. Методи оцінки техногенного впливу на довкілля: навч. посібник. Одеса: Букаєв Вадим Вікторович, 2021. 118 с. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10029/1/ChyhayAV_MetOсTehnogenVplyvy_2021.pdf (дата звернення: 08.08.2025).
15. ДСП 173-96. Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Київ: МОЗ України, 1996. 72 с. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text> (дата звернення: 28.08.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 669.1:504.064.4

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.19>

АКТУАЛЬНИЙ СТАН ТА ДЕКАРБОНІЗАЦІЙНІ ВИКЛИКИ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ

Матухно О.В.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро
Німецьке екологічне агентство (Umweltbundesamt)
Buchholzweg, 8, 13627, Berlin
matukhno.o.v@nmu.one

Здійснено комплексний аналіз сучасного стану металургійної галузі України в умовах війни та визначено ключові декарбонізаційні виклики, що формують траєкторію її розвитку відповідно до вимог європейської кліматичної політики. Актуальність дослідження зумовлена подвійним викликом: необхідністю післявоєнного відновлення економіки та адаптації до Європейського зеленого курсу. Методика дослідження базується на поєднанні статистичного, порівняльного та аналітичного методів. Для зіставлення з країнами ЄС застосовано уніфіковані аналітичні критерії: інтенсивність викидів CO₂ на тону сталі, показник внеску галузі у загальні викиди CO₂ по країнах, відсоток електросталеплавильного виробництва у технологічних маршрутах країн. Це дозволило оцінити технологічне відставання української металургії, виявити бар'єри та потенціал скорочення викидів. Визначено, що більшість підприємств функціонує із застарілим обладнанням, має високу карбоємність, а показники інтенсивності викидів CO₂ майже удвічі перевищують середньоєвропейські. Низька ставка вуглецевого податку не створює економічних стимулів для глибокої зеленої трансформації виробництва, а тому модернізаційні процеси в металургійній промисловості України мають локальний характер і не призводять до інтенсивного впровадження принципово нових технологій. В обговоренні співставлено результати дослідження з європейським досвідом переходу металургійних підприємств до низьковуглецевих технологій. Наукова новизна полягає у системному зіставленні технологічних і соціально-економічних характеристик металургійної галузі України в умовах війни та їх узгодження з інструментами кліматичної політики ЄС. Визначено ключові бар'єри низьковуглецевого переходу: технічні, фінансові, інституційні та кадрові. Практичне значення результатів роботи полягає у можливості використання отриманих висновків для розробки державних і корпоративних стратегій декарбонізації, оновлення Плану відновлення України, секторальних дорожніх карт і підготовки до інтеграції української промисловості у європейську кліматичну політику. Розвиток української металургії має спиратися на принципи декарбонізації, екологічної та енергетичної модернізації, що забезпечить її конкурентоспроможність на ринках ЄС у межах реалізації Європейського зеленого курсу. *Ключові слова:* декарбонізація, викиди CO₂, кліматична політика, Україна, металургійна галузь, низьковуглецеві технології.

Current state and decarbonization challenges of Ukraine's metallurgical industry. Matukhno O.

The article provides a comprehensive analysis of the current state of Ukraine's metallurgical industry in the context of war and identifies key decarbonization challenges that shape its development trajectory in line with European climate policy requirements. The relevance of the study arises from a dual challenge: the need for post-war industrial recovery and adaptation to European Green Deal objectives. The research methodology is based on a combination of statistical, comparative, and analytical methods. Unified analytical criteria were applied for comparison with EU countries: CO₂ emissions intensity per ton of steel, the industry's contribution to total CO₂ emissions by country, and the percentage of electric steel production in the technological routes of countries. This made it possible to assess the technological lag of Ukrainian metallurgy, identify barriers and the potential for reducing emissions. It was determined that most enterprises operate with outdated equipment, have high carbon intensity, and CO₂ emission intensity indicators are almost twice as high as the European average. The low carbon tax rate does not create economic incentives for a profound green transformation of production, and therefore modernization processes in Ukraine's metallurgical industry remain incremental and do not lead to the intensive introduction of fundamentally new technologies. The discussion compares the results of the study with the European experience of the transition of metallurgical enterprises to low-carbon technologies. The scientific novelty lies in the systematic comparison of the technological and socio-economic characteristics of Ukraine's metallurgical industry in the context of war and their alignment with EU climate policy instruments. The key barriers to low-carbon transition have been identified: technical, financial, institutional, and human resources related. The practical significance of the results lies in the possibility of using the conclusions to develop state and corporate decarbonization strategies, update Ukraine's Recovery Plan, sectoral roadmaps, and prepare for the integration of Ukrainian industry into European climate policy. The development of Ukrainian metallurgy should be based on the principles of decarbonization, environmental and energy modernization, which will ensure its competitiveness in EU markets within the framework of the European Green Deal. *Key words:* decarbonization, CO₂ emissions, climate policy, Ukraine, metallurgical industry, low-carbon technologies.

Постановка проблеми. Металургійна промисловість є важливою складовою економіки України, що забезпечує значну частку промислового виробництва та експорту. Питання конкурентоспроможності української металургії на міжнародному ринку останні роки було актуальним через зміни в гло-

бальній кліматичній політиці. Однак з початку повномасштабної війни в 2022 році, галузь зіткнулася з низкою нових внутрішніх та зовнішніх викликів, які суттєво вплинули на її функціонування. Так, блокада портів і порушення логістики змусили Україну переорієнтовувати металургійну продукцію

на європейські ринки, де діють жорсткі екологічні стандарти. Відсоток експорту української сталі до ЄС виріс з 35% у 2021 році до 57% у 2022-му [1]. Кліматична політика ЄС передбачає значне скорочення викидів парникових газів, що ускладнює експорт металопродукції з високим вуглецевим слідом і стимулює перехід до низьковуглецевих технологій. Без суттєвої декарбонізації технологій українська металургія ризикує втратити доступ до ринків ЄС через впровадження Механізму коригування вуглецю на кордоні (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). Металургійний сектор залишатиметься ключовим для майбутнього економічного розвитку та відновлення України після війни, а тому потребуватиме глибокої модернізації на основі принципів енергоефективності та переходу до низьковуглецевих технологій.

Актуальність дослідження полягає в тому, що на сучасному етапі перед Україною постає подвійний виклик: відновлення зруйнованої промислової інфраструктури та необхідність адаптації до європейських екологічних вимог. Таким чином, зовнішні обставини створили підґрунтя для переосмислення структури промисловості України: замість відновлення застарілих підприємств слід впроваджувати сучасні, енергоефективні та екологічно чисті технології з низьким карбоновим слідом. Орієнтація на «зелену» металургію дасть змогу залучити міжнародну фінансову підтримку, зокрема в межах програм реконструкції та адаптації до кліматичних змін.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження є складовою наукової дискусії щодо шляхів низьковуглецевого розвитку промисловості України та інтеграції у кліматичну політику ЄС і поглиблює наукове розуміння процесів декарбонізації промисловості. Результати дослідження мають практичне значення для формування національних та корпоративних стратегій декарбонізації, удосконалення промислової та екологічної політики, реалізації Плану відновлення України та Низьковуглецевої стратегії України до 2050 року, розробки заходів адаптації галузі до дії інструментів європейської кліматичної політики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання перспектив розвитку української металургії активно досліджувалося до повномасштабного вторгнення росії в Україну. Так, в роботі [2] визначено довгострокові тенденції і напрямки розвитку металургійних підприємств України в довоєнних умовах, в роботі [3] проаналізовано основні етапи ринкової трансформації металургійної галузі. Автори [4, 5] змоделивали вплив Найкращих Доступних Технологій (Best Available Techniques, англ. BAT, укр. НДТ) на викиди CO₂ української металургійної промисловості. У дослідженні [6] визначено варіанти політичних рішень (10 «Policy Proposals») задля декарбонізації металургійної галузі України.

У зв'язку зі змінами в глобальній кліматичній політиці, євроінтеграцією та підтримкою Україною Європейського зеленого курсу (Green Deal) виконувались дослідження щодо шляхів декарбонізації металургійної промисловості [7-8]. Автори [9-10] оцінили фактори, що вплинули на роботу металургійної промисловості з початку повномасштабної війни. В роботі [11] визначено основні виклики металургійної галузі після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну. В дослідженні [12] виконано аналіз та прогнозування можливих змін розташування металургійних заводів і перерозподілу ресурсів у післявоєнних умовах, розроблено стратегії зеленої торгівлі чавуном і сталлю. Автори [13] запропонували загальну концепцію сталого післявоєнного розвитку української металургії.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність публікацій присвячених модернізації та декарбонізації української металургії, відсутні узагальнюючі аналітичні дослідження, які системно оцінюють поточний стан галузі в умовах війни та офіційно задекларовані державні й корпоративні плани відновлення в контексті дотримання європейської кліматичної політики. Запропоноване дослідження спрямоване на комплексну оцінку поточного стану галузі та узагальнення існуючих стратегічних ініціатив, що визначають рамкові умови для майбутньої декарбонізації.

Новизна статті. У дослідженні вперше системно зіставлено технологічні, енергетичні, соціально-економічні аспекти функціонування української металургійної галузі в контексті декарбонізації; визначено бар'єри для переходу до низьковуглецевих технологій (технічні, фінансові, кадрові) та узгоджено національні стратегії з інструментами європейської кліматичної політики.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід інтегрує техніко-економічний і соціальний аналіз у межах єдиної аналітичної рамки, що дозволяє оцінювати вплив кліматичної політики на структурну трансформацію промислових секторів. Під час зіставлення показників української металургії і країн ЄС використовувались уніфіковані аналітичні критерії, зокрема: інтенсивність викидів CO₂ на тону сталі, частка технологічних процесів з низькою емісією CO₂ у загальному випуску сталі. Застосування цих критеріїв дало змогу кількісно оцінити технологічну відсталість і потенціал скорочення викидів української металургії відносно середньоєвропейських показників, а також визначити пріоритети інвестиційної та технологічної політики для наближення до стандартів ЄС. Отримані результати сприяють розвитку методології оцінки низьковуглецевих трансформацій у країнах перехідного типу під час кризових ситуацій.

Методика дослідження: кабінетне дослідження (збір наявних технічних звітів, аналітичних та стра-

тегічних документів, національних оглядів, інвентаризацій); метод аналізу (детальне вивчення зібраної інформації, її структурування); метод синтезу; метод класифікації; статистичний аналіз, а саме статистичне спостереження, порівняння, зведення та групування матеріалів статистичних спостережень.

Мета дослідження полягає у комплексному аналізі поточного стану української металургійної галузі в умовах війни та у визначенні ключових декарбонізаційних викликів, які формують траєкторію її подальшого розвитку відповідно до вимог європейської кліматичної політики.

Виклад основного матеріалу. Промисловість України історично мала значні ресурси та можливість виробництва сталі та чавуну. У ході російсько-української війни українська металургійна промисловість зазнала суттєвих втрат. До 2014 року в країні працювало дванадцять металургійних підприємств. У 2025 році на підконтрольній Україні території залишилося лише шість металургійних підприємств, з яких працюють п'ять (табл. 1, розроблено автором на основі джерел [6, 14, 15, дані з сайтів підприємств, власні розрахунки]).

До технічних аспектів декарбонізаційних викликів української металургії слід віднести застарілі технології та обладнання. Більшість українських підприємств чорної металургії оснащені старим обладнанням, експлуатуються понад нормативні терміни. Ступінь зношеності основних засобів в металургійній промисловості становить понад 50% (таблиця 2, розроблено автором на основі джерел [16-18]).

Виробництво сталі в Україні здійснюється за трьома технологічними маршрутами. Найпоширенішим виробничим маршрутом в Україні є «доменна піч-основна киснева піч» (рис. 1, розроблено автором на основі джерела [19]).

Україна ще використовує застарілі та карбоносмі технології такі як мартенівський спосіб виробництва. До війни відсоток мартенівського виробництва в Україні складав біля 18%. Слід зазначити, що мартенівське виробництво супроводжується найбільшою емісією CO₂ в порівнянні з іншими способами виплавки сталі і ЄС вже повністю відмовився від мартенівських печей. В Україні також існували плани модернізації та поступової відмови від мартенівських печей та переходу на конвер-

Таблиця 1

Проектні потужності та випуск сталі металургійними підприємствами, які працюють на підконтрольній Україні території

Назва	Процес*, кількість устаткування	Максимальна виробнича потужність	Випуск продукції, млн. т							Завантаженість, %			
			2013	2015	2017	2019	2021	2023	2024	2021	2023	2024	
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (Кривий Ріг)	BF, 6	11,45	н/д	н/д	н/д	н/д	5,30	1,52	2,17	46	13	19	
	BOF, 6	6,5	6,47	6,09	5,81	5,33	4,90	0,97	1,65	75	15	25	
АТ «Запоріжсталь» (Запоріжжя)	BF, 4	4,5	3,22	н/д	н/д	4,49	4,50	2,72	3,10	100	60	69	
	ОНФ, 7+1**	4,7	3,82	3,99	3,93	4,01	3,80	2,47	2,89	81	53	61	
ПрАТ «Каметсталь» (Кам'янське)	BF, 3	4,35	н/д	н/д	н/д	н/д	0,85	1,77	1,82	20	41	42	
	BOF, 2	3,85	2,93	2,33	1,36	2,22	0,93	2,02	2,1	24	52	55	
ТОВ «Інтерпайп Сталь» (Дніпро)	EAF, 1	1,32	1,03	0,58	0,86	0,85	0,97	0,69	0,84	73	52	64	
Дніпровський металургійний завод («DCH Steel») (Дніпро)	BF, 2	1,795	н/д	н/д	н/д	н/д	0,16	Не виплавлялась сталь та чавун (виготовлялась продукція з матеріалів замовника)			11	н/д	н/д
	BOF, 3	1,23	1,0	1,01	0,92	0,51	0,273				22	н/д	н/д
ПАТ «Електро-металургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна (Запоріжжя)	EAF, 4	0,91	0,27	0,24	0,26	0,22	0,21	0,08	0,09	23	9	10	

* BF – Blast Furnace – доменна піч; BOF – Basic Oxygen Furnace – основна киснева піч (кисневий конвертер); EAF – Electric Arc Furnace – електродугова піч; ONF – Open-Hearth Furnaces – мартенівська піч

**7 мартенівських печей та 1 двованна сталеплавильна установка, яка є модернізованою мартенівською піччю

Ступінь зношеності основних засобів у металургії України

Показник	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ступінь зношеності основних засобів у металургії, %	44,7	41,2	41,2	54,8	65,1	68,9	50,7	55,4	55,8	55

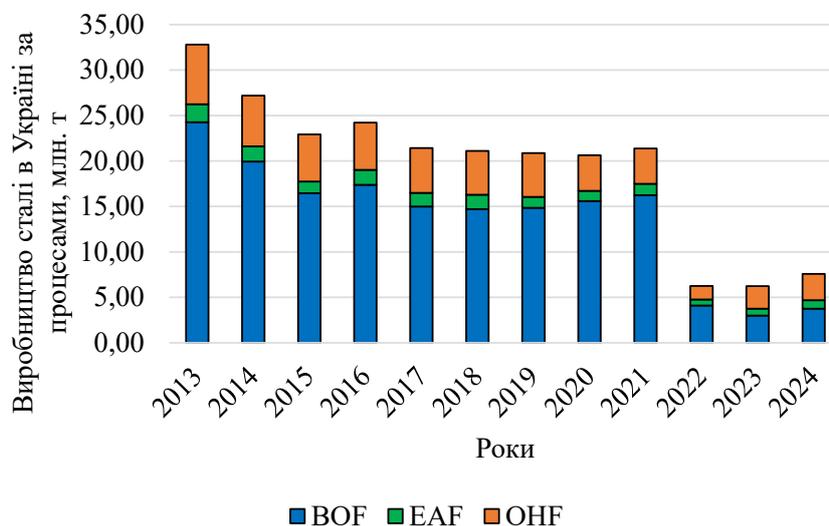


Рис. 1. Виробництво сталі в Україні за процесами

терне виробництво і збільшення електричних печей. Понад 70% сталі українські підприємства до війни виробляли в кисневих конверторах, але через втрату маріупольських підприємств (ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «Маріупольській металургійний комбінат ім. Ілліча») цей показник знизився до 48% у 2023 році, а відсоток мартенівської сталі в загальному виробництві збільшився до 39,6. Показник по електропечам в Україні у 2023 році залишався в 2,3 рази нижче, ніж в світі та в 3,6 разів нижче, ніж в ЄС.

Оскільки вуглецевий податок в Україні залишається одним з найнижчих в світі і дорівнює лише 30 грн. за тону CO_2 (приблизно 0,6 євро на 2025 рік), це нівелювало його ефективність і промисловість не мала економічних стимулів модернізувати технологічні процеси. З часів надбання незалежності в Україні було заплановано декілька проектів переходу на електросталеплавильне виробництво загальною капітальною вартістю 2 млрд. доларів [14]. Не усі проекти були реалізовані, а частина реалізованих проектів знищена через війну.

Через наявні застарілі технології українська металургійна продукція характеризується високою карбоно- та енергоємністю. Інтенсивність викидів CO_2 чорної металургії в Україні досягає 2,33 тону CO_2 на тону сталі, у ЄС – 1,15 [20]. Більшість викидів парникових газів пов'язані з процесом відновлення заліза в доменній печі (68% від загального обсягу прямих викидів). Українське доменне виробництво

має низький потенціал до зниження викидів ПГ тому що модернізації доменних печей в Україні надавалася значна увага підприємств та науковців до війни і українському доменному виробництві вже максимально задіяно НДТ (ВАТ) [21-22]. Конвертерна технологія також не має значного потенціалу для зниження викидів. За розрахунками [4-5] застосування НДТ (ВАТ) дозволить знизити викиди ПГ на 25-30%, що недостатньо для досягнення кліматичних цілей.

Світова статистика та свідчить, що на металургійну промисловість припадає приблизно 7-9% від загальних глобальних викидів CO_2 . Для України цей показник значно вище: за підрахунками автора на базі даних [23] – 15,86% у 2021 році. Вибір країн для порівняння ґрунтувався на обсягах річного виробництва сталі та викидах CO_2 в 2019 році (рисунок 2, розроблено автором на основі джерел [14, 22, 24]).

Внесок Української металургії в загальні викиди по країні є найвищим серед країн, що розглядаються. Це пов'язано з високою карбоємністю та застарілими технологіями української металургії, Україна демонструє найнижчий відсоток використання електричних печей (5,8%). Цікавим є приклад Польщі, яка при зростанні виробництва (на 13% порівняно з базовим 2013 роком) одночасно досягла зниження викидів CO_2 (зниження на 3%), що може бути пояснено активним застосуванням електричних печей (45,1%). Найкращі показники демонструє Італія з часткою електросталеплавильної 81,9% та зниженням

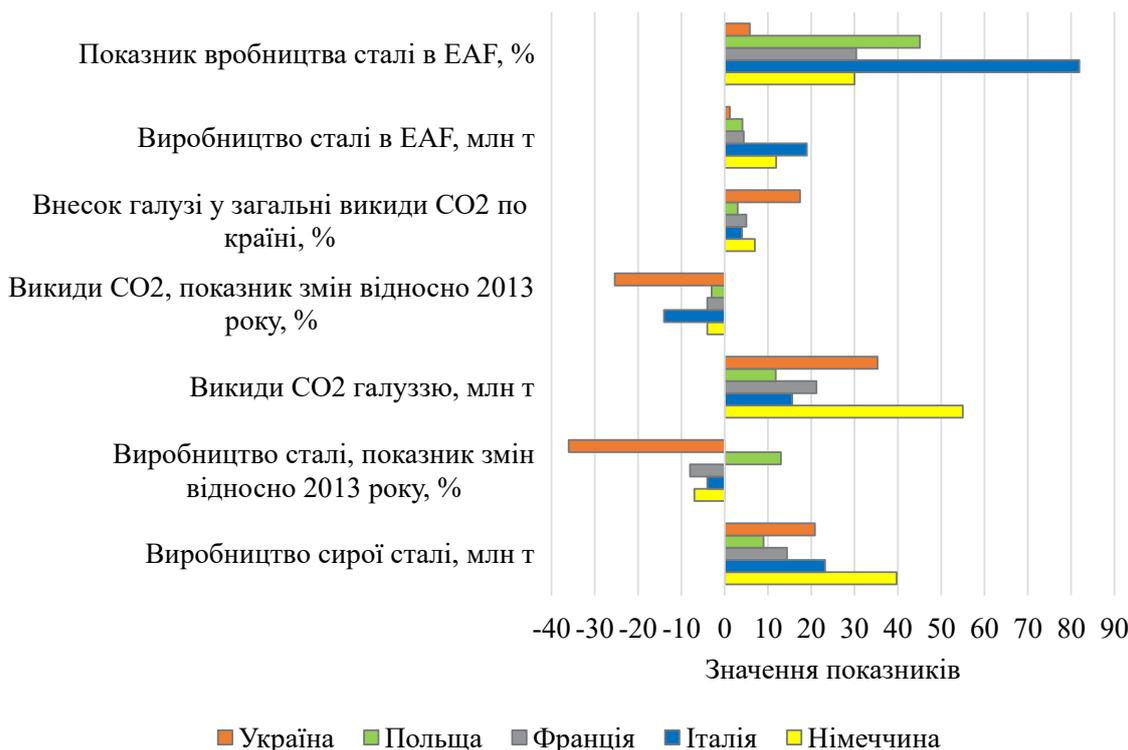


Рис. 2. Показники металургійного сектору України та окремих країн ЄС (2019 рік)

викидів на 14% при зниженні виробництва на 4% порівняно з базовим 2013 роком.

Економічні аспекти декарбонізаційних викликів металургійної галузі України полягають у інвестиціях. Металургійні підприємства України з часів надбання незалежності інвестували переважно в капітальні ремонти та енергомодернізацію, а не в перехід на нові технологічні процеси з низькою емісією CO₂. За даними GMK-Center [25, 26] в середньому 70% капітальних інвестицій до війни витрачалося на підтримку існуючих потужностей. Головним джерелом фінансування інвестицій є власні кошти підприємств. Найбільша кількість інвестиційних проектів у 2015-2021 роках впроваджувалась в доменному переділі: загальна кількість 13 проектів, вартістю майже 454 млн. \$. Для порівняння за зазначений проміжок часу впроваджено 4 проекти в коксохімічному виробництві, вартість 182 млн. \$, 3 в сталеливарному, вартість 303 млн. \$. Значна кількість проектів була реалізована на великих підприємствах в Маріуполі (ПрАТ «Азовсталь» та ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча»), які були знищені на початку 2022 року.

У 2021 році металургійний сектор забезпечував кожен третій долар у загальному обсязі капітальних інвестицій у промисловість України. Капітальні інвестиції найбільших металургійних компаній України у 2023 році були на 72% нижче, ніж у 2021 році та склали 254 млн. \$ (рисунком 3, розроблено автором на

основі джерел [25, 26]). Але таке падіння відповідає падінню випуску основної продукції, що означає, що капітальні витрати на тонну сталі залишилися наближені до показників 2021 року. Падіння обсягів інвестицій в 2015-2016 році були пов'язані як з втраченою контролю над частиною підприємств на окупованих росією територіях, так і через падіння цін на світовому ринку, що вплинуло на інвестиційні можливості підприємств. Однак, за підрахунками GMK-Center [25] в перерахунку на тонну сталі інвестиції у 2016-2020 роках зросли та склали 29,2 \$/т сталі у порівнянні з інвестиціями 23 \$/т сталі протягом 2010-2015 років.

При цьому слід відмітити, що для підтримання конкурентоздатності української металургійної продукції на міжнародних ринках галузь потребує кардинальної технологічної модернізації, а відповідно, більших капітальних інвестицій. За оцінками GMK-Center для досягнення вуглецевої нейтральності українська сталеливарна промисловість до 2022 року потребувала інвестицій у розмірі 25,5 млрд. \$, цифру оновлено у 2025 році і вона складає 12 млрд. \$ [25, 26]. При цьому, наприклад, інвестиційний план АрселорМіттал Кривий Ріг ставив на меті досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року і закладав 1 млрд. на капітальні витрати протягом 2022-2032 років. Міжнародна гірничо-металургійна група компаній Метінвест розглядала можливість будівництва нового сталеплавильного виробни-

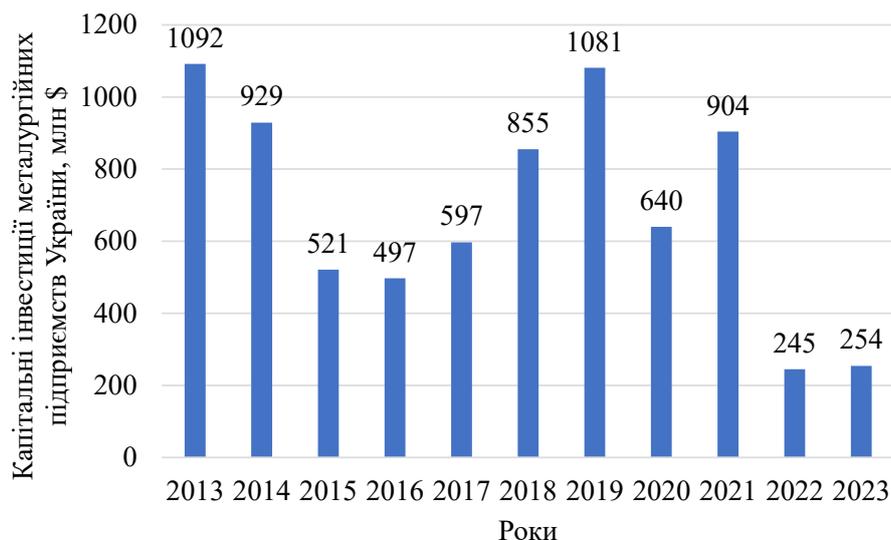


Рис. 3. Капітальні інвестиції металургійних підприємств України, млн. \$

цтва з модулями виробництва чавуну прямого відновлення (DRI) і заводу EAF для гарячої обробки DRI вартістю щонайменше \$3-3,5 млрд CAPEX. Група Метінвест незважаючи на втрати своїх підприємств у Маріуполі інвестувала у 2023 році у виробничі потужності металургійного виробництва «Каметсталь» та «Запоріжсталь» 65 млн. \$. А протягом 5-10 років після завершення війни Метінвест планувала глибоку декарбонізацію своїх українських активів загальною вартістю біля 9 млрд. Компанія Інтерпайп у 2024 році презентувала інвестиційний проект з будівництва другої черги електросталеплавильного комплексу «Інтерпайп Сталь» для розширення «зелених» потужностей виробництва сталі, вартістю близько 1 млрд. \$.

Не менш важливим за технічні та економічні виклики є соціальні проблеми металургійної галузі України, які полягають в суттєвому зменшенні кадрового потенціалу з 2022 року. Так, до 2021 року у галузі працювало близько 209 тис. осіб [17], а у 2025 лише 98 тис. осіб [27], що пов'язано як з втратами виробничих потужностей, так й з мобілізацією персоналу металургійних підприємств до Збройних сил України, що додатково скоротило кадровий ресурс галузі на 15-20%. Значний мультиплікаційний ефект галузі (один працівник у металургії до війни забезпечував у середньому 4,5 робочих місця у пов'язаних секторах економіки) здійснює суттєвий вплив на загальну зайнятість у металургійних регіонах і на національну економіку.

Обговорення результатів дослідження.

Результати дослідження демонструють, що головними декарбонізаційними викликами для української металургії залишаються висока вуглецевість і низький рівень технологічної модернізації. Інтенсивність викидів CO₂ у металургійній галузі України перевищує показники ЄС майже в 2 рази,

що вказує на системну залежність від доменно-конвертерного циклу з використанням коксу та природного газу. Ця технологічна інерція зумовлена як відсутністю економічних стимулів (низький вуглецевий податок), так і обмеженим доступом до інвестиційних ресурсів та інноваційних технологій.

Попри часткову модернізацію (капремонти, енергозбереження), більшість проєктів мають локальний, обмежений ефект, а не трансформаційний характер, тобто спрямовані на продовження життєвого циклу технологічних маршрутів, а не на їх заміну. Порівняно з країнами ЄС, де розпочато масштабне впровадження водневих і електросталеплавильних технологій (HYBRIT та H2Green Steel в Швеції, SALCOS у Німеччині) Україна перебуває лише на початковому етапі планування низьковуглецевого переходу.

Застосування НДТ (BAT) металургійними підприємствами України потенційно дозволить скоротити викиди ПГ на 25-30%, однак цього недостатньо для досягнення кліматичних цілей (кліматична нейтральність до 2050 року). Для порівняння європейські виробники (ArcelorMittal Europe, ThyssenKrupp, Voestalpine) планують скорочення викидів на 30-50% вже до 2030 року завдяки частковому переходу на газово- або водневе пряме відновлення заліза (Direct Reduction Iron, DRI) і розширенню електросталеплавильних потужностей (EAF). Таким чином, без масштабної технологічної трансформації українська сталь залишатиметься неконкурентною в умовах дії CBAM.

З точки зору економічних аспектів, високі інвестиційні бар'єри залишаються ключовими обмеженнями. Під час війни структура планованих інвестицій змістилась у бік підтримки існуючих потужностей (ремонт, енергомодернізація), тоді як проєкти зі створення нових низьковуглецевих вироб-

ництв залишаються на рівні концепцій. Позитивним сигналом є плани підприємств щодо DRI та EAF орієнтованих проєктів [25], які, однак, потребують міжнародного фінансування.

Соціальний вимір декарбонізації є не менш значущим. Втрата понад 100 тис. робочих місць і мобілізація персоналу посилюють проблему кадрового дефіциту, що може ускладнити майбутню модернізацію. Водночас концепція «Справедливого переходу» (Just Transition) вимагає поєднання технологічної та соціальної трансформації, тобто перепідготовки кадрів, створення нових робочих місць у суміжних «зелених» галузях (енергетика, машинобудування). Досвід Польщі та Чехії демонструє, що синхронізація промислової політики з регіональними програмами зайнятості значно знижує соціальні ризики від переходу до низьковуглецевої економіки.

У цьому контексті План відновлення України відіграє системоутворюючу роль. У Плані передбачено інвестиції у «зелені» металургійні потужності: будівництво EAF для виробництва 2,5-5 млн. т зеленої сталі; створення H_2 -сумісних модулів DRI/HBI (Hot-Briquetted Iron, гарячобрикетоване залізо) для виробництва 5 млн. т DRI/HBI; будівництво/модернізація фабрик збагачення залізної руди (флотація) та будівництво нових потужностей для виробництва 7 млн. т окатишів класу DR. Ці заходи можуть стати ядром формування нової промислової моделі в Україні, відповідають принципам Європейського зеленого курсу і підтримують інтеграцію України до європейського кліматичного простору, проте для їх реалізації потрібна синергія державної політики, міжнародного фінансування і корпоративних стратегій.

Отже, результати дослідження свідчать, що декарбонізація української металургії можлива лише

за умов інституційної інтеграції з європейською кліматичною політикою, масштабної трансформації технологічних процесів і переорієнтації інвестицій на низьковуглецеві виробництва. Без цього галузь ризикує втратити конкурентні позиції на внутрішньому ринку ЄС після повного запуску СВМ.

Висновки. Металургійна галузь України характеризується високою вуглецеємністю, енегоемністю та технологічною відсталістю, що унеможливорює конкурентність у межах політики Європейського зеленого курсу без глибокої модернізації.

Впровадження СВМ і декарбонізаційні цілі ЄС формують зовнішній стимул до низьковуглецевої трансформації української металургії.

Післявоєнне відновлення має стати переходом до низьковуглецевих технологій (електропечі, пряме відновлення заліза, водневі технології), що забезпечать зменшення викидів CO_2 , відповідність кліматичним зобов'язанням України і збереже конкурентоздатність металургійної продукції на ринку ЄС.

Реалізація «зеленої» трансформації металургійної галузі України потребує державної підтримки, міжнародного фінансування та координації з європейськими екологічними програмами.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть стати основою для подальшого моделювання сценаріїв розвитку української металургійної галузі, оцінки економічної ефективності впровадження низьковуглецевих технологій під впливом інструментів кліматичної політики ЄС (Система торгівлі викидами, СВМ), також можуть бути корисними у державному плануванні (оновлення Плану відновлення України, секторальні дорожні карти декарбонізації), при розробці корпоративних стратегій металургійних компаній.

Література

1. Агапова В. Заблокована логістика, світова конкуренція та трикратне падіння експорту. Як війна змінила українську металургію, яка давала основний приплив валюти. *Дослідження «Вокс Україна»*. 2023. 27 червня. URL: <https://forbes.ua/money/eksport-metaloproduktii-vprav-utrichi-shcho-viyna-zminila-v-ukrainskikh-metallurgiv-yaki-davali-osnovnikh-pritok-valyuti-v-krainu-27062023-14446>
2. Нікіфорова В. А. Довгострокові фактори і тенденції розвитку металургії України. *Економіка промисловості*. 2022. № 1(97). С. 32-60. DOI: 10.15407/econindustry2022.01.032
3. Венгер В. В., Романовська Н. І., Чижевська М. Б. Тенденції та вектори розвитку металургійної галузі України. *Агросвіт*. 2022. № 4. С. 37-47. DOI: 10.32702/2306-6792.2022.4.37
4. Shatokha V., Matukhno E. Climate change mitigation scenarios for the Ukrainian steel sector based on Best Available Technologies deployment. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021. № 8 (2). P. 507-517. URL: https://procedia-esem.eu/pdf/issues/2021/no2/21_53_Shatokha_21.pdf
5. Shatokha V., Matukhno E., Belokon K., Shmatkov G. Potential Means to Reduce CO_2 Emissions of Iron and Steel Industry in Ukraine Using Best Available Technologies. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2020. № 6 (3). P. 451-462. DOI:10.1007/s40831-020-00289-0
6. Saha, D. Towards a decarbonisation of Ukraine's steel sector. Selected high-impact measures. *Low Carbon Ukraine*. 2021. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Towards-a-decarbonisation-of-Ukraines-steel-sector-1.pdf>
7. Wiesinger H., Zinchenko S., Tarasenko, A., Gluschenko A. Decarbonization of the steel industry: a challenge for the coming decades. *GMK Center*. 2021. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/07/Decarbonisation-eng_2021.pdf
8. Бабаченко О.І., Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Є. Перспективи декарбонізації металургійних технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2021. Вип. 35. С. 4-33. DOI: 10.52150/2522-9117-2021-35-4-33
9. Liahovska O., Koval, L. The current state of the Ukrainian metallurgical industry. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Bankowej w Poznaniu*. 2022. № 98(3). P. 37-45. DOI: 10.58683/01.3001.0016.2749

10. Narivskiy A., Smirnov O., Timoshenko S. Steel production in Ukraine: current state and prospects (review). *Metal and Casting of Ukraine*. 2022. Vol. 30, № 3 (330). P. 28-47. URL: <https://www.metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/26/26>
11. Двудіт З.П., Андрусак К.А. Виклики металургійної галузі України в умовах сьогодення. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення та проблеми розвитку*. 2023. № 1(9). С. 261-268. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/sep/31284/menedzhment-265-272.pdf>
12. Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 466. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675.
13. Тубольцев Л.Г., Меркулов О.Є., Пригунова А.Г., Нарівський А.В. Концепція сталого розвитку чорної металургії України в сучасних умовах. *Метал та лиття України*. 2022. Том 30. № 4. С. 8-19.
14. Ukrainian Iron & Steel Industry in Figures 2020. *GMK Center*. 2022. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2020/07/Ukrainian-iron-steel-industry-in-figures-2020_compressed-6.pdf.
15. The Results of the Mining & Metallurgical Complex of Ukraine Activity in 2020. *Ukrmetallurgprom*. 2021. URL: <https://www.ukrmetprom.org/the-results-of-the-mining-metallurgical-complex-of-ukraine-activity-in-2020/>
16. Нікіфорова В. Економічний огляд металургійної галузі України. *Інститут економіки промисловості НАН України*. 2019. 7 листопада. URL: <https://rating.zone/ekonomichnyj-ohliad-metalurhijnoi-haluzi-ukrainy>
17. Промисловість України у 2016 -2020 роках: стат. зб. / Державна служба статистики України, Київ. 2021. 296 с. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2021/zb/12/zb_prom_16_20.pdf
18. Fixed assets and capital investments. Depreciation rate of fixed assets / Державна служба статистики України. 2024. URL: <https://stat.gov.ua/en/topics/fixed-assets-and-capital-investments>
19. World steel website. URL: <https://worldsteel.org/>
20. Koolen D., Vidovic D. Greenhouse gas intensities of the EU steel industry and its trading partners. Joint Research Centre Technical Report, JRC129297. *Publications Office of the European Union, Luxembourg*. 2022. DOI: 10.2760/170198
21. Оцінка конкурентоспроможності виробників сталі України за показниками викидів CO₂. *GMK-Center*. 2021. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2022/08/Ud_vybrosy.pdf
22. Шатоха В.І., Матухно О.В. Моделювання сценаріїв модернізації металургійної галузі України до 2030 року з метою скорочення викидів діоксиду вуглецю. *Екологічні науки*. 2020. № 3(30). С. 104-109. DOI: 10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.17
23. 2024 National Inventory Document. Ukraine. *United Nations Climate Change*. URL: <https://unfccc.int/documents/645143>
24. Mendelevitch R., Hermann H., Graichen V., Bibu T., Lettow F., & Nissen Ch. Development of the iron and steelmaking sector under the EU-ETS. Overview and country-level analysis from 2005 to 2019. *Report as part of joint project with INFRAS*. Zurich. Öko-Institut, Berlin. 2022. 150 p.
25. Iron & steel sector of Ukraine: investments in the future. Investment outlook of Ukrainian iron & steel companies. *GMK Center*. 2021. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2021/12/2021_GMK-Invest-Eng.pdf
26. Воронцов І. Декарбонізація сталевих промисловості України: європейський шлях. *GMK Center* 2025. 16 жовтня. URL: <https://gmk.center/ua/posts/dekarbonizaciya-stalevoi-promislovosti-ukraini-ievropejskij-shlyah/>
27. Zinchenko S. Opportunities for rebuilding for iron and steel industry of Ukraine. *OECD Steel Committee, 97th Session*. (Paris, 31 March-1 April 2025). 22 P. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/2025_Ukr-IS-Rebuild.pdf

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 631.84:504

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.20>

АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КАПСУЛЬОВАНИХ АЗОТНИХ ДОБРИВ

Нагурський О.А., Брановський М.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів

Oleg.A. Nahursky@lpnu.ua

У статті здійснено комплексний аналіз екологічної та агрономічної ефективності капсульованих азотних добрив із контрольованим вивільненням у порівнянні з традиційними гранульованими формами. На основі узагальнення результатів численних вітчизняних і зарубіжних досліджень обґрунтовано переваги використання капсульованих добрив у системах живлення польових культур, особливо для умов Західної України. Встановлено, що контрольоване вивільнення азоту забезпечує рівномірне надходження поживних речовин упродовж вегетаційного періоду, підвищує коефіцієнт використання азоту рослинами в середньому у 1,5–2,5 рази та зменшує ризики перенасичення ґрунтового розчину, що характерне для швидкорозчинних гранульованих форм. Показано, що застосування капсульованих добрив сприяє скороченню втрат азоту через вимивання нітратів на 40–50%, зниженню пікових викидів парникового газу N_2O на 38–55% і зменшенню деградаційних процесів у ґрунті, зокрема втрат гумусу та кислотності. Доведено, що поступове надходження азоту з полімерних капсул забезпечує більш стабільний розвиток рослин, покращення структури врожаю та підвищення продуктивності культур на 15–60%. Ураховуючи низький вміст доступного азоту в дерново-підзолистих і лісових ґрунтах регіону, впровадження технологій контрольованого вивільнення азоту є одним із найефективніших інструментів для зниження екологічного навантаження, оптимізації живлення культур і підвищення родючості ґрунтів. Незважаючи на вищу вартість таких препаратів, економічний ефект їх використання проявляється у зростанні врожайності, зменшенні кількості внесень і скороченні витрат на додаткові підживлення. Отримані результати свідчать, що капсульовані азотні добрива забезпечують одночасне досягнення трьох стратегічних цілей сучасного землеробства – підвищення ефективності виробництва, мінімізацію екологічних ризиків і збереження родючості ґрунтів. Застосування таких добрив може стати важливим елементом адаптації аграрного сектору Західної України до кліматичних викликів та умов сталого розвитку, поєднуючи економічну доцільність з екологічною безпекою. *Ключові слова:* капсульовані добрива, контрольоване вивільнення, азот, ефективність використання, нітратне вимивання, парникові викиди, екологічна безпека.

Analysis of the ecological efficiency of encapsulated nitrogen fertilizers. Nahurskyi O., Branovskyi M.

The article presents a comprehensive analysis of the ecological and agronomic efficiency of encapsulated nitrogen fertilizers with controlled release compared to traditional granular forms. Based on the synthesis of numerous domestic and international research findings, the advantages of using encapsulated fertilizers in crop nutrition systems are substantiated, particularly under the conditions of Western Ukraine. It has been established that controlled nitrogen release ensures a uniform supply of nutrients throughout the growing season, increases the nitrogen use efficiency by crops by an average of 1.5–2.5 times, and reduces the risk of soil solution oversaturation, which is typical for fast-dissolving granular forms. The study shows that the use of encapsulated fertilizers helps reduce nitrogen losses through nitrate leaching by 40–50%, decreases peak emissions of the greenhouse gas N_2O by 38–55%, and mitigates soil degradation processes, including humus loss and acidification. It is proven that the gradual release of nitrogen from polymer capsules provides more stable plant growth, improves crop structure, and increases productivity by 15–60%. Considering the low availability of nitrogen in sod-podzolic and forest soils of the region, the implementation of controlled-release nitrogen technologies is one of the most effective tools for reducing environmental impact, optimizing crop nutrition, and enhancing soil fertility. Despite the higher cost of such formulations, their economic benefits are manifested in increased yields, fewer applications, and lower costs for additional fertilization. The results indicate that encapsulated nitrogen fertilizers enable the simultaneous achievement of three strategic goals of modern agriculture—enhancing production efficiency, minimizing environmental risks, and preserving soil fertility. The application of such fertilizers can become an essential element in adapting the agricultural sector of Western Ukraine to climate challenges and sustainable development conditions, combining economic feasibility with environmental safety. *Key words:* encapsulated fertilizers, controlled release, nitrogen, use efficiency, nitrate leaching, greenhouse emissions, environmental safety.

Постановка проблеми. Урожайність польових культур значною мірою залежить від доступності азоту ґрунтового розчину. Проте традиційне застосування азотних добрив часто нерациональне: за різними оцінками, до 50–60% внесеного азоту не засвоюється рослинами і втрачається в ґрунт-гідросферу чи атмосферу [1, 2]. Це спричиняє деградацію ґрунтів і забруднення водних ресурсів [3]. Одним із шляхів підвищення ефективності азотного живлення є використання добрив із контр-

ольованим (повільним) вивільненням, зокрема гранул у полімерній оболонці [4, 5]. Капсульовані (полімерно-інкапсульовані) азотні добрива забезпечують контрольоване, поступове вивільнення N, що призводить до підвищення коефіцієнта використання добрива, зниження пікових концентрацій нітратів у ґрунтовому розчині, скорочення вимивання NO_3^- і зменшення ранніх пікових емісій N_2O . У результаті застосування таких добрив можливе одночасне підвищення врожайності за ниж-

чих екологічних ризиків і покращення економічної ефективності агровиробництва.

Урахування специфіки ґрунтів і клімату Західної України (поширені дерново-підзолисті та лісові ґрунти з відносно низьким вмістом рухомого азоту та підвищеною вразливістю до вимивання) робить необхідним регіональне оцінювання екологічної та агроекономічної ефективності капсульованих N-добрив. Практичне обґрунтування переваг або обмежень їхнього застосування дозволить зменшити ризики забруднення ґрунтових і поверхневих вод, скоротити парникові викиди та підвищити стійкість агроecosystem до змін клімату й гідрології, що має як наукове, так і прикладне значення для політики сталого використання добрив [6, 7].

Отже, дослідження, спрямоване на порівняльний аналіз капсульованих і традиційних гранульованих N-добрив за показниками доступності азоту для рослин, втрат азоту (вимивання, випаровування, N₂O-емісії), залишкового N у ґрунті та економічної ефективності, є актуальним і обґрунтованим для вирішення міждисциплінарних задач агрономії, ґрунтознавства й екологічного управління ресурсами.

Матеріали і методи. Проведено систематичний огляд опублікованих досліджень, присвячених впливу капсульованих (контрольованого вивільнення) азотних добрив у порівнянні з традиційними формами N-добрив. Пошук літератури здійснювався в провідних міжнародних базах (Web of Science, Scopus, PubMed) та в національних репозиторіях із використанням релевантних ключових слів англійською й українською (наприклад: «controlled-release fertilizer», «капсульовані добрива», «nitrate leaching», «N₂O emissions», «nitrogen use efficiency»). Відбір публікацій проводили у два етапи – первинний скринінг за назвами та анотаціями і подальший перегляд повних текстів; оцінювання здійснювали двоє незалежних рецензентів, у разі розбіжностей остаточне рішення приймав третій рецензент. До аналізу включалися емпіричні роботи (польові, лізиметричні та лабораторні експерименти), які містили дані про вимивання нітратів, кумулятивні викиди N₂O, рівень поглинання азоту рослинами, урожайність або економічні показники. З кожного джерела систематично вилучали основні метадані та результати (автори, рік, тип дослідження, об'єкт дослідження, тип і норма добрива, ключові результати та їх похибки). Якість включених досліджень оцінювали за адаптованими критеріями для агрономічних експериментів.

Результати. Капсульовані добрива забезпечують рівномірніше й триваліше надходження N до кореневої зони [8, 9]. Так, експерименти показали, що рослини, підживлені капсульованими добривами, виростають кращими та рівномірнішими, ніж при звичайному гранульованому підживленні [10, 11]. Це пояснюється тим, що звичайні гранульовані добрива швидко розчиняються після внесення і створюють

пікове перенасичення ґрунту азотом на початку вегетації, а потім нестачу пізніше, тоді як у капсулах поживні речовини надходять до ґрунтового розчину поступово [12].

За польовими даними, капсульовані N-добрива суттєво підвищують коефіцієнт використання добрива (відношення врожаю до внесеної діючої речовини). Для картоплі, наприклад, K_{ef} (т урожаю на т діючої речовини) становив $\approx 33,4$ для звичайного гранульованого добрива, тоді як для капсульованих сумішей – від $\approx 50,2$ до $\approx 84,5$ (на 1,5–2,6 рази більше) [13, 14]. Відповідно приріст урожаю (порівняно з контролем без добрив) зростав з $\approx 13,6$ т/га у варіанті з гранульованим добривом до $\approx 17,7$ – $31,0$ т/га за капсульованими (особливо помітний варіант із мультикомпонентною полімерною оболонкою – $+31,0$ т/га) [15, 16]. Тобто при меншій кількості внесеного азоту окупність і врожайність значно вищі.

За даними вітчизняних досліджень, ґрунтовий покрив України загалом характеризується дефіцитом азоту на всіх орних землях [25]. Це підтверджується результатами агрохімічних обстежень: близько 90% українських ґрунтів мають низький або дуже низький вміст доступного азоту, а середнє значення легкогідролізованого азоту становить лише ≈ 111 мг/кг [24, 25]. Особливо це стосується полісних і лісостепових ґрунтів західного регіону (дерново-підзолистих, темно- і світло-сірих лісових, бурих). Вміст гумусу в таких ґрунтах (а він є основним резервом азоту) звичайно складає лише ~ 1 – 4% , що відповідає приблизно 15–60 т/га гумусу [21, 22]. Відповідно, валовий запас азоту у верхньому шарі зростає разом із гумусом – від $\sim 1\%$ (для малогумусних дерново-підзолистих) до 15–20 т/га (для багатогумусних буроземів Карпатського передгір'я) [22].

У дерново-підзолистих ґрунтах (поширених у Поліссі та Карпатах) частка рухомого азоту (нітратного та аміачного) може сягати 40–50% від загального його запасу, тоді як у чорноземах – лише 20–40% [23]. Проте абсолютні запаси рухомих форм азоту у ґрунтах Західної України залишаються низькими. Це узгоджується з даними 11-го туру агрохімічного обстеження: вміст легкогідролізованого азоту у ґрунтах Львівської та Рівненської областей протягом 2016–2020 рр. зменшувався до рівнів, нижчих за середньоукраїнські [24]. Загалом залишковий азот формується в ґрунті внаслідок мінералізації органічної речовини та внесення добрив, але суттєву роль відіграє також попередник культури і умови вирощування.

Водночас надлишок нітратів у ґрунті часто втрачається через вимивання. Зокрема, при інтенсивному зяблевому обробітку органічної речовини одним із кінцевих продуктів мінералізації є нітрати, але за високої вологості або після опадів надлишок нітратів «витікає» з поля, не приносячи користі рослинам [23]. На осушених дерново-підзолистих землях (типових для Полісся) нітратна форма азоту майже

Таблиця 1

Порівняння основних показників капсульованих і традиційних гранульованих добрив

Показник	Гранульовані добрива	Капсульовані добрива
Швидкість вивільнення N	$\sim 2/3$ дози вивільняється за 3 дні [1, 2]	$\sim 2/3$ дози вивільняється за ~ 22 дні [3, 4]
Розвиток рослин	Менший (пікове перенасичення) [10, 11]	Кращий (рівномірне живлення) [12, 13]
Урожайність картоплі (приріст)	+13.6 т/га [15]	+17.7–31.0 т/га [15, 16]
$K_{эф}$ (т урожаю/т N) картоплі	≈ 33.4 [14]	≈ 50.2 –84.5 [14]
Відсоток втрат азоту	Вищий (значний стік у гліб) [12]	Нижчий ($\approx 47\%$ втрат) [17]
Накопичення N у ґрунті	Низьке (швидке вимивання) [18]	Вище (повільний перехід, краще утримання) [19]
N_2O -емісії (пікові)	Високі (до 1140 $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{год}$) [16]	Значно нижчі (-38 – 55% від піку) [17]
Нітратне вимивання	Більше [18]	Менше (≈ 41 – 54% менше NO_3^-) [17]
Кількість внесень	Багаторазове [13]	Зазвичай одноразове [13]
Вартість препарату	Доступніша [20]	Вища (але із економією ресурсів) [20]

не затримується: тому восени вносити нітратні добрива не рекомендується, адже вони не засвоюються рослинами і вимиваються в дренажні води [23]. Таким чином, залишковий азот у цих ґрунтах активно залучається лише за сприятливих умов (відсутність вимивання), а його надлишок може швидко бути втрачений.

Залишковий азот – це та частина внесених добрив, яка не була поглинута рослинами. Він накопичується, якщо норма добрив перевищує потребу рослин і показник NUE (ефективність використання азоту) низький. При надлишкових нормах азоту «можуть утворюватись значні запаси залишкового азоту» [26]. Кількість цього залишку залежить і від ґрунту, і від погодних умов: в умовах помірного клімату надлишковий азот або втрачається, або накопичується, залежно від властивостей ґрунту. Важливо також враховувати потенціал N_{min} ґрунту (запаси мінералізованого азоту), адже «його обсяг залежить від виду ґрунту, і різні ґрунти потребують різного об'єму так званого залишкового азоту» [27]. Наприклад, на легких підзолистих ґрунтах велика частина внесеного азоту може залишатись у верхніх шарах та бути вразливою до вилуговування.

Гранульовані мінеральні добрива (аміачна селітра, сірчаноокислий амоній, карбамід тощо) швидко розчиняються у ґрунтовій воді і переводяться в нітратну форму. Якщо перед внесенням або навесні рослинність поглинає азот мало (низька біомаса), залишок нітратів накопичується. Наприклад, дослідники відзначають, що при інтенсивному застосуванні азотних добрив у меліорованих угіддях Полісся відбувається «накопичення нітратів у верхніх шарах ґрунту», особливо під час періодів інтенсивного внесення добрив [28].

Накопичення залишкового азоту змінює агрохімічний склад ґрунту. Надлишок нітратів активі-

зує мінералізацію органічної речовини, що веде до втрати гумусу (за даними, 1 кг азоту добрив може стимулювати мінералізацію 1–20 кг гумусу). Крім того, амонійні добрива «призводять до декальцинації, дегуміфікації та деструктуризації» ґрунту. У результаті в ґрунті зменшується вміст обмінного кальцію і магнію, підвищується кислотність і погіршуються фізичні та мікробіологічні властивості. Особливо чутливі до цього легкі, малобуферні дерново-підзолисті та сірі лісові ґрунти Західної України. Накопичений нітратний азот частково може бути використаний посівами наступного року. Так, у дослідях встановлено, що після внесення значних норм азоту озима пшениця наступного року «ефективно утилізує залишковий азот в ґрунті і знижує його втрати від вилуговування». Тобто культурозміни можуть дещо компенсувати залишкові запаси N . Проте інші культури (кукурудза, буряк, соя тощо) зазвичай мають високу потребу в новому азоті і не повністю використовують залишки, що призводить до їх вимивання. Отже, агрохімічно надлишковий азот можна розглядати й як марнотратне використання добрив: оптимальне удобрення потребує точного урахування залишкових запасів, оскільки неврахований залишок означає непотрібні витрати і можливе зниження ефективності наступних підживлень [29].

Через швидке розчинення звичайні гранульовані добрива дають значний первинний стік азоту з ґрунту [12, 18]. Експерименти показують, що приблизно $2/3$ внесеного гранульованого азоту вимиваються з ґрунту вже протягом перших 3 діб після внесення [1, 2]. Натомість у капсульованих добривах азот поступово переходить у ґрунтовий розчин і лише за ~ 22 доби досягає подібної величини вивільнення [3, 4].

Дослідження свідчать, що капсульовані добрива зменшують сумарні втрати азоту з агросистеми:

наприклад, втрати нітратів і амонію скорочувалися на ~47,4% (≈ 106 кг/га за посівами картоплі) [17]. Це свідчить про вищий вміст залишкового N у ґрунті після внесення капсул, ніж при традиційній технології [18]. Навіть за умов рясних опадів капсульовані добрива показували менший стік азоту: за 20-денний дослід на гребеневому ґрунті сумарний винос нітратного азоту знизився на 41–54% у порівнянні з добривами без оболонки [17, 19]. Таким чином, у короткостроковій перспективі після внесення капсул у ґрунті накопичується більше доступного азоту, що також поліпшує довгострокову родючість [11].

Капсульовані добрива значно знижують екологічні ризики, пов'язані з застосуванням азоту [16, 17]. Плавне вивільнення азоту зменшує пікові концентрації у ґрунтовому розчині і, як наслідок, ризики перенасичення ґрунту та анаеробних умов [16, 17]. При цьому емісії парникового N_2O від капсульованих добрив у короткостроковій перспективі суттєво менші: у моделювальних дослідях максимальні потоки N_2O у перші дні після внесення були в капсульованих сумішах на 38–55% нижчими, ніж після внесення звичайної сечовини [16, 17]. Хоча кумулятивна різниця N_2O за 20 діб була статистично незначущою, загальний профіль викидів зміщувався в часі (максимум спостерігався пізніше при капсулах) [17].

Також вимивання нітратів у ґрунтові води зменшується: полімерні капсульовані азотні добрива знизили сумарний стік NO_3^- на 41–54% порівняно зі звичайним кабамідом [17, 19]. У поєднанні з вологим кліматом Західної України це означає менший ризик забруднення ґрунтових вод нітратами та подальшої евтрофікації водойм [16, 17, 19].

Капсульовані азотні добрива мають суттєві переваги в економічному плані, хоча початкові витрати на придбання препаратів вищі (на 25–40%) [20]. Однак завдяки підвищенню врожайності і зменшенню втрат азоту загальна ефективність використання N-добрив зростає, що робить їх рентабельними у середньостроковій перспективі [8, 9, 20]. Наприклад, у дослідях із зерновими культурами підвищення урожайності становило 8–15% при одноразовому внесенні капсульованого добрива порівняно з кількома внесеннями традиційної мочевины [20]. Крім того, застосування капсул спрощує технологічний процес внесення, зменшуючи потребу у багатократних підживленнях [13]. З огляду на екологічні вигоди (менше N_2O , менше стоку нітратів), можна оцінити загальну економічну ефективність капсульованих добрив як вищу за традиційні [16, 17, 20].

Обговорення. Капсульовані азотні добрива забезпечують більш рівномірне та протяжне вивільнення доступного азоту порівняно з традиційними гранульованими формами, що супроводжується підвищенням коефіцієнта використання добрива та збільшенням врожайності в ряді дослідів [8–16]. Динаміка вивільнення N визначає основні агроно-

мічні та екологічні ефекти: пом'якшення тимчасових коливань доступності азоту в ризосфері дозволяє рослинам ефективніше використовувати внесений елемент у періоди інтенсивного росту, зменшуючи одночасно умови, сприятливі для інтенсивного вилугування і пікових газових емісій. Це пояснює як підвищення K_{ef} , так і зниження пікових потоків N_2O і вимивання NO_3^- у короткострокових експериментах [12, 16–19].

Екологічні наслідки полягають насамперед у зменшенні гострих піків концентрацій нітратів у ґрунтовому розчині та, відповідно, зменшенні ризику їхнього переносу у водні системи, що має практичне значення для охорони якості водних ресурсів у регіонах із високим ризиком вимивання. Одночасно спостережуване зменшення максимальних потоків N_2O у ранній період після внесення може знизити миттєвий парниковий внесок сільськогосподарських операцій; проте доступні дані свідчать, що для оцінки кумулятивних сезонних викидів потрібні довші та ширші спостереження, оскільки сумарні показники іноді не відрізняються істотно між формами добрив [16].

З практичної точки зору застосування капсульованих добрив виправдане в системах, де важлива стабільність постачання азоту і де ризик вимивання є високим (легкі ґрунти, регіони з частими інтенсивними опадами), а також у господарствах, що прагнуть зменшити кількість міжрядних підживлень. Водночас економічна доцільність визначається місцевими умовами – цінами на добрива та продукцію, логістикою, наявністю субсидій і агротехнічними практиками – і тому потребує адаптованого аналізу для кожної агроєкосистеми [8, 13, 20]. Для Західної України, де широка частина орних земель має низький вміст доступного азоту і помірний вміст гумусу, капсульовані технології можуть сприяти зменшенню деградаційних процесів у ґрунті та поліпшенню якості води, якщо їх застосування буде інтегроване з іншими заходами підвищення органічної речовини та збереження структури ґрунту [21–29].

Слід також відзначити наукові та технічні обмеження: більшість досліджень мають короткостроковий характер і охоплюють одну кілька вегетацій, тому питання довготривалих наслідків (зокрема накопичення полімерних оболонок, вплив на фізико-хімічні властивості ґрунту і мікробіоту) лишається відкритим. Варіабельність реакцій різних культур на профілі вивільнення азоту ускладнює універсальні рекомендації без попередньої адаптації під конкретні культури й умови. Подальші дослідження мають бути спрямовані на багаторічні багатолокаційні випробування, оптимізацію конструкції капсул і матеріалів оболонки, комплексні оцінки життєвого циклу (LCA) та економічні моделі собівартості в різних сценаріях ринку, щоб повніше оцінити довгострокові агрономічні та екологічні ефекти.

Висновки. Капсульовані азотні добрива є технологічно й екологічно обґрунтованою альтернативою традиційним гранульованим формам, оскільки забезпечують більш ефективне використання азоту, сприяють підвищенню врожайності та водночас зменшують негативний вплив на довкілля. Проведений аналіз засвідчив, що уповільнене вивільнення поживних речовин із полімерної оболонки запобігає швидкому накопиченню нітратів у ґрунті, скорочує втрати азоту через вимивання і випаровування, знижує викиди N_2O та стабілізує баланс поживних елементів у агроєкосистемі. Для легких і середньосуглинкових ґрунтів Західної України така технологія дозволяє мінімізувати

дегуміфікацію, покращити структуру ґрунту й водний режим, зменшити ризики забруднення підземних і поверхневих вод. Економічна ефективність використання капсульованих добрив полягає не лише у збільшенні врожайності, а й у зниженні витрат на повторні внесення, що робить їх конкурентоспроможними у довгостроковій перспективі. Таким чином, впровадження добрив із контрольованим вивільненням азоту є перспективним напрямом екологізації землеробства, який поєднає підвищення продуктивності з охороною природних ресурсів і сприяє формуванню стійких агроландшафтів, здатних адаптуватися до сучасних екологічних і економічних викликів.

Література

1. Bernal M. P., Fenoll J. Controlled-release nitrogen fertilizers and their impact on nitrate leaching in temperate soils. *Agricultural Water Management*. 2021. Vol. 247. P. 106734. DOI: 10.1016/j.agwat.2021.106734.
2. Blaylock A. D., Tindall T. A. Controlled-release fertilizers: Principles and practices for nitrogen management. *Agronomy Journal*. 2020. Vol. 112, No 5. P. 3987–3996. DOI: 10.1002/agj2.20356.
3. Chen J., Liu X., Wang H., Li X., Zhang Y. Mitigation of nitrous oxide emissions from farmland by polymer-coated urea: A meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 356. P. 131870. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131870.
4. European Commission. Best Available Techniques (BAT) for the Production of Fertilizers. Joint Research Centre, 2022. URL: <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu>.
5. FAO. Sustainable soil fertility management and nitrogen efficiency. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021.
6. Głodowska M., Wesolowski M., Szewczuk C. Efficiency of polymer-coated urea under different soil moisture regimes in Central Europe. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2020. Vol. 29(5). P. 3391–3400. DOI: 10.15244/pjoes/118322.
7. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2022: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Rome: FAO, 2022.
8. Marenych, M., Koba, K., Hanhur, V., Semenov, A., Len, O., Yemko, L., ... & Yeleussinov, B. (2024). Effect of Fertigation with Urea-Ammonium Nitrate on the Seed Yield of Maize Maternal Lines. *Agriculture*, 70(4), 218-229.
9. Li Y., Zhao B., Xu J. Comparison of conventional and controlled-release urea fertilizers on nitrogen losses and crop yields: A field study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2023. Vol. 30. P. 18892–18903. DOI: 10.1007/s11356-023-24940-1.
10. Міністерство аграрної політики та продовольства України. Методичні рекомендації з ефективного використання азотних добрив у сільському господарстві України. Київ: Мінагрополітики України, 2021.
11. Тимчук, І. С. (2016). АГРОЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА КАПСУЛЬОВАНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРИВ В УМОВАХ ЗАХОДУ УКРАЇНИ (Doctoral dissertation, Національний університет «Львівська політехніка»).
12. Novikov V., Hlushko O. Nitrate leaching and nitrous oxide emissions under different nitrogen fertilizer regimes in Ukrainian Chernozem soils. *Eurasian Soil Science*. 2020. Vol. 53(8). P. 1102–1113. DOI: 10.1134/S1064229320080071.
13. Pan B., Lam S. K., Mosier A. R., Luo Y., Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers in China: A meta-analysis and modeling approach. *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 266. P. 115368. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115368.
14. Синельников, С. Д. (2021). Екологічна безпечна утилізація відходів поліетилентерефталату використанням їх для капсулювання мінеральних добрив (Doctoral dissertation, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України).
15. Singh B., Craswell E. Slow-release and controlled-release fertilizers to improve nitrogen use efficiency and reduce losses. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2021. Vol. 121(3). P. 209–226. DOI: 10.1007/s10705-021-10145-5.
16. Włodarczyk T., Cieślak W. Controlled-release nitrogen fertilizers as a tool to mitigate nitrate pollution in European agriculture. *Environmental Research*. 2020. Vol. 191. P. 110048. DOI: 10.1016/j.envres.2020.110048.
17. Yin S., Chen Q., Guo Z. Environmental impacts and nitrogen fate of polymer-coated urea in agricultural soils: A global review. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 920. P. 171035. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171035.
18. Zhao Y., Liu Q., Wang X. Evaluation of polymer-coated urea fertilizers under different rainfall regimes. *Agricultural Sciences*. 2020. Vol. 11(8). P. 863–873. DOI: 10.4236/as.2020.118054.
19. Баранов, В. І., & Гавриляк, М. Я. Вплив капсульованої нітроамофоски на вміст пігментів фотосинтезу, цукрів, нітратів та важких металів у рослинах ранньої цибулі. II-й Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю, 2009. Секція 5 Хімія довкілля та екоотоксикологія. проблеми змін клімату та біосфери. контроль за атмосферними викидами у світлі кіотського протоколу, С. 355-357.
20. Zhou W., Liang G., Zhang F. Nitrogen release dynamics and soil residual nitrogen after application of coated urea. *Journal of Soils and Sediments*. 2023. Vol. 23(5). P. 1742–1754. DOI: 10.1007/s11368-023-03245-8.
21. Дмитрієвцева Н. В. Динаміка зміни вмісту гумусу основних типів ґрунтів Рівненської області. Зернові культури. 2024. Т. 8, № 1. С. 180–186. DOI: 10.31867/2523-4544/0327.

22. Томашівський З. М., Конік Г. К. Наукові основи системи землеробства в західному регіоні України. Львів: СПОЛОМ, 2020. 286 с.
23. Національний науковий центр «Інститут землеробства НААН». Сучасні системи удобрення в землеробстві України: науково-методичні рекомендації. Чабани: ННЦ Інститут землеробства НААН, 2020. 85 с.
24. Романова С. Якість ґрунтів України та їх придатність для сільгоспвиробництва – результати агрохімічного обстеження. SuperAgronom.com. 20.12.2023. URL: <https://superagronom.com/articles/699-yakist-gruntiv-ukrayini-ta-yih-pridatnist-dlya-silgospvirobnitstva--rezultati-agrohimichnogo-obstejennya>.
25. Національна доповідь про стан родючості ґрунтів України. Київ: МінАПК, 2010. Держ. технолог. центр охорони родючості ґрунтів, НААН. URL: http://www.ioqu.gov.ua/literature/periodically/1_2010.pdf.
26. Eriksson J., Magnusson M. Optimized winter wheat production in Kiev region of Ukraine – A case study on cultivation properties and management focusing on sowing date and nitrogen fertilization. Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Soil and Environment. 2015. 87 p.
27. Ярошко М. Перетворення азоту у ґрунті і його значення для росту рослин. Агроном. 2013.
28. Сташук М. О. Моделювання зон, уразливих до накопичення нітратів у ґрунтових екосистемах Полісся під впливом меліоративних систем і сільськогосподарської діяльності. Охорона ґрунтів. 2024. С. 22.
29. Багнюк Д. О., Сербенюк А. А. Екологічне значення вирощування пшениці озимої в сівозміні. Збірник матеріалів доповідей міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених. НУБіП України, 2023. С. 8. URL: <https://superagronom.com/blog/894-vpliv-mineralnih-dobriv-na-vlastivosti-gruntu-ta-gvk>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 628.5:546.296:691

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.21>

ТЕХНОЛОГІЯ КОНТРОЛЮ ТА ЗМЕНШЕННЯ РАДОНУ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ ІЗ РАДОНОВМІСНОЇ СИРОВИНИ

Нагурський О.А., Марфутін А.Б.

Інститут сталого розвитку імені В'ячеслава Чорновола
Національного університету «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, 79013, м. Львів
oleg.a.nahursky@lpnu.ua

У статті розглянуто технологічні рішення, спрямовані на мінімізацію радіологічного та екологічного ризику від матеріалів, що містять природні радіонукліди. Головну увагу зосереджено на стратегіях контролю джерел радону, методах попередньої обробки сировини, утриманні радону в структурі матеріалів, архітектурних та інженерно-технологічних засобах захисту. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний експериментально-аналітичний підхід, який поєднує лабораторні вимірювання, порівняльний аналіз і практичну оцінку ефективності технологічних рішень у виробничих умовах. Дослідження проводили на підприємстві, що спеціалізується на виготовленні бетонних виробів – плит, бруківки та бордюрного каменю, які активно застосовуються у житловому та промисловому будівництві. Було відібрано зразки основних складових матеріалів (пісок, цемент, щебінь різних фракцій), визначено їхні радіологічні властивості за допомогою професійного радонового детектора AlphaE (Radon Monitor), а також проведено аналіз питомої активності природних радіонуклідів і потенційного рівня екзальтації радону. Отримані результати дозволили кількісно оцінити вплив фізико-хімічних характеристик сировини, зокрема гранулометричного складу, вологості та пористості, на інтенсивність радоновиділення та ефективність заходів щодо його зниження. Експерименти показали, що поєднання фізико-хімічної обробки сировини (миття, сортування, ущільнення), використання спеціальних домішок для зменшення капілярно-пористої структури, а також впровадження інженерних рішень із вентиляції та герметизації фундаментів дозволяє знизити концентрацію радону у внутрішньому повітрі приміщень на 50–70 %.

Результати підтверджують, що системний підхід до контролю радону забезпечує довготривалу стабільність параметрів радіаційної безпеки, підвищує екологічну надійність продукції та відповідає сучасним вимогам сталого будівництва. Запропонований підхід є практично орієнтованим на потреби будівельної галузі й може бути використаний як основа для розроблення національних рекомендацій, методичних положень і нормативних документів зі зниження радонових ризиків у технологіях виробництва будівельних матеріалів. *Ключові слова:* радон, будівельні матеріали, природні радіонукліди, радіаційна безпека, радоновиділення, екологічний ризик, контроль радону.

Technology of radon control and reduction in the production of building products from radon-containing raw materials. Nahursky O., Marfutin A.

The article considers technological solutions aimed at minimizing radiological and environmental risks from materials containing natural radionuclides. The main attention is focused on strategies for controlling radon sources, methods of pre-treatment of raw materials, radon retention in the structure of materials, architectural and engineering and technological means of protection. To achieve the set goal, a comprehensive experimental and analytical approach was used, which combines laboratory measurements, comparative analysis and practical assessment of the effectiveness of technological solutions in production conditions. The research was conducted at an enterprise specializing in the manufacture of concrete products – slabs, paving stones and curbstones, which are actively used in residential and industrial construction.

Samples of the main constituent materials (sand, cement, crushed stone of various fractions) were selected, their radiological properties were determined using a professional radon detector AlphaE (Radon Monitor), and an analysis of the specific activity of natural radionuclides and the potential level of radon exaltation was also conducted. The results obtained allowed us to quantitatively assess the influence of the physicochemical characteristics of the raw materials, in particular the grain size distribution, humidity and porosity, on the intensity of radon release and the effectiveness of measures to reduce it. Experiments have shown that the combination of physicochemical processing of raw materials (washing, sorting, compaction), the use of special additives to reduce the capillary-porous structure, as well as the implementation of engineering solutions for ventilation and sealing of foundations allows us to reduce the concentration of radon in the indoor air of premises by 50–70%.

The results confirm that a systematic approach to radon control ensures long-term stability of radiation safety parameters, increases the environmental reliability of products and meets the modern requirements of sustainable construction. The proposed approach is practically oriented to the needs of the construction industry and can be used as a basis for the development of national recommendations, methodological provisions and regulatory documents to reduce radon risks in building materials production technologies. *Key words:* radon, building materials, natural radionuclides, radiation safety, radon release, environmental risk, radon control.

Постановка проблеми. Виробництво будівельних матеріалів із використанням сировини, яка містить природні радіонукліди, створює значну екологічну загрозу через можливе виділення радону –

радіоактивного інертного газу, що негативно впливає на здоров'я людини.

Актуальність дослідження. Радон належить до ключових джерел іонізуючого опромінення людей.

Його концентрація у повітрі житлових та громадських приміщень значною мірою залежить від властивостей будівельних матеріалів. Тому контроль рівня радону є важливим для забезпечення радіаційної та екологічної безпеки в будівництві.

Практичне завдання. Дане дослідження спрямоване на вдосконалення виробничих технологій із врахуванням вимог радіаційної безпеки. Його результати можуть бути використані для розробки національних стандартів і рекомендацій щодо контролю радону в будівництві.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми. Раніше не до кінця було досліджено вплив фізико-хімічних властивостей матеріалів, методів обробки сировини, а також архітектурно-конструктивних рішень на рівень радоновиділення, що формує необхідність подальшого вивчення цих питань.

Наукова новизна. У роботі запропоновано інтегрований підхід до зниження викидів радону, починаючи від вибору сировини, включаючи процес виробництва виробництво до архітектурного проектування. Такий підхід дозволяє зменшити рівень радоновиділення на 50–70 %. Доведено ефективність комбінованого використання фізичних, хімічних і конструктивних методів захисту.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Раніше увага дослідників зосереджувалася переважно на окремих аспектах природної радіоактивності будівельних матеріалів. Однак недостатньо висвітлювалися практичні технології зменшення радонових ризиків на всіх етапах виробничого процесу, що обумовило актуальність проведення цього дослідження.

Загальнонаукове значення. Розроблений експериментально-аналітичний підхід може слугувати інструментом для оцінювання радонових ризиків, вдосконалення технологій виготовлення будівельних матеріалів і розвитку систем екологічного моніторингу в галузі радіаційної безпеки.

Виклад основного матеріалу. Радон (Rn-222) є природним радіоактивним газом, який виникає внаслідок розпаду урану та торію, що знаходяться в земній корі. Невидимий та без запаху, він є одним з основних джерел іонізуючого випромінювання для людини. У сфері будівельної індустрії сировина, така

як магматичні породи, цемент, летюча зола або певні види граніту, може містити різні рівні природних радіонуклідів. Радіоактивність будівельних матеріалів і виробів може призводити до зовнішнього і внутрішнього опромінення людини [1]. Зовнішнє опромінення залежить від активності матеріалу і виникає через опромінювання радіонуклідів ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , які містяться в ньому. Внутрішнє опромінення відбувається через вдихання радону ^{222}Rn і його продуктів розпаду. Перевірка радіологічних властивостей матеріалів і сировини дозволяє визначити рівень природного випромінювання та запобігти накопиченню небезпечних концентрацій радону в приміщеннях, що важливо не лише для користувачів, а й для працівників на підприємствах [4]. Радіоактивність природних будівельних матеріалів залежить від родовища, тому контроль і вибір методів захисту навколишнього середовища мають дві основні цілі: зменшити викиди радону та зберегти якість внутрішнього і зовнішнього середовища.

Джерела та механізми випромінювання радону в матеріалах.

Радон (^{222}Rn) виникає в результаті природного радіоактивного розпаду радію (^{226}Ra). На сьогоднішній день є лише три природні ізотопи. Вони походять з різних природних серій розпаду: ^{219}Rn (розмовно відомий як актинон) походить з серії розпаду актинію (^{235}U), ^{220}Rn (торон) походить з серії розпаду торію (^{232}Th), а ^{222}Rn (радон) походить з ланцюга розпаду ^{238}U , що містяться в різних мінералах земної кори. У таблиці 1 наведено періоди напіврозпаду кожного ізотопу, а також його режим розпаду та енергію [6].

Тому головними джерелами радону в будівельних матеріалах таких як цемент, бетон, глину, граніт, щебінь чи пісок є саме природні радіонукліди [5]. Кількість радону, що виділяється, напряму залежить від вмісту урану і торію в цій сировині – чим вищий їхній рівень, тим більший потенціал радіоактивного газоутворення.

Процес утворення та виходу радону з матеріалу відбувається постійно, але його інтенсивність залежить від низки чинників. Важливу роль відіграє структура матеріалу: чим більше в ньому пор, мікротріщин і каналів, тим легше радон може мігрувати назовні. Температура і вологість також впливають на цей процес при підвищеній температурі газ рухається актив-

Таблиця 1

Деякі ядерні характеристики основних ізотопів радону

Джерело радіаційної родини	Ізотоп	Історична назва	Енергія віддачі 10^3V^*	Енергія розпаду віддачі 10^3V^*	Період напіврозпаду
^{235}U	^{219}Rn	актинон	103	a(6,82)	3,96 s
^{232}Th	^{220}Rn	торон	103	a(6,29)	55,6 s
^{238}U	^{222}Rn	радон	86	a(5,49)	3,82 j

* $1\text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$

ніше, а за надмірної вологості може вивільнятися швидше через розширення мікропор [8].

Крім того, спосіб виробництва та щільність матеріалу мають значення: ущільнені або випалені матеріали з дрібнозернистою структурою значно менше пропускають радон, ніж пористі або слабо ущільнені. Процеси «видиху» газу через мікротріщини та поверхневі дефекти є основним шляхом його виходу в навколишнє середовище.

Отже, інтенсивність випромінювання радону визначається не лише природною радіоактивністю сировини, а й фізичними властивостями самого матеріалу та умовами його експлуатації. Розуміння цих механізмів дає змогу контролювати радоновиділення на етапах виробництва, обробки та використання будівельних виробів, зменшуючи потенційний радіаційний ризик для людини.

Технології зменшення та контролю. Вибір та попередня обробка сировини.

Рівень радону в будівельних матеріалах значною мірою визначається властивостями сировини, з якої вони виробляються. Тому одним із ключових способів зниження радоновиділення є радіологічний аналіз матеріалів, таких як глина, цемент, щебінь або пісок, ще до їх використання у виробництві. Особливу увагу слід приділяти походженню цих матеріалів, оскільки навіть у межах одного родовища рівні природної радіоактивності можуть значно відрізнятись.

Ще на стадії підготовки сировини можна застосувати технології, спрямовані на скорочення потенціалу радоновиділення. Для пористих матеріалів, наприклад, ефективними є методи ущільнення, які зменшують проникність для радону. Крім того, використання мінеральних домішок або модифікаторів структури допомагає зменшити кількість мікропор, через які газ може виходити назовні. Ще одним дієвим підходом є заміна або часткове виключення сировини з підвищеним урановим чи торієвим складом. Сучасні технології все частіше застосовують методи сортування й фракціонування, що дозволяють видаляти дрібні частинки, які містять найбільші концентрації радіонуклідів. Це не тільки знижує радіаційне навантаження готового матеріалу, а й покращує його фізико-механічні характеристики. Таким чином, ефективне управління рівнем радону починається ще на етапі вибору й обробки сировини.

Утримання та стабілізація радону в матриці.

Радон утворюється в результаті розпаду радію, що природно міститься у мінеральних матеріалах, таких як глини, граніти, цемент тощо. Під час його утворення всередині цих матеріалів радон здатний виходити через мікропори та тріщини. Завдання технологів полягає в тому, щоб зробити структуру матеріалу такою, яка мінімізуватиме цей процес. Одним із основних способів утримання радону є ущільнення структури матеріалу. Якщо основа (матриця), в якій розподілені частинки сировини, має щільну й малопористу структуру, радон залишається всередині,

поступово розпадаючись і не переходячи в повітря. Для досягнення цієї мети у виробництві застосовують спеціальні прийоми, такі як оптимізація температури випалу чи додавання мінеральних і полімерних добавок, здатних зменшувати пористість.

Ще один підхід – це хімічна або структурна фіксація радону, коли створюються умови для зв'язування атомів радію та продуктів його розпаду у стійкі сполуки або їх рівномірного розподілу в матеріалі. Для цього важливо правильно підібрати компоненти. Наприклад, можуть використовуватись матеріали з високими сорбційними властивостями або мікроструктури, здатні ефективно «поглинати» радон [7]. Загалом, утримання та стабілізація радону в матеріалах є не тільки технічним завданням, але й важливим екологічним викликом. Рівень радіаційної безпеки приміщень залежить від того, наскільки результативно матеріал перешкоджає виходу радону. Через це сучасні виробники будівельних матеріалів все частіше впроваджують технології контролю пористості, вологості й складу, забезпечуючи надійність та безпечність продукції протягом усього періоду її експлуатації.

Вентиляція та архітектурне проектування.

Сучасні архітектурні рішення спрямовані на зменшення проникнення радону з ґрунту чи будівельних матеріалів (включно: бруківок, бардюрного каменя і т.і.) у повітря приміщень. Вентиляція, при цьому, відіграє ключову роль. Навіть якщо вживані будівельні матеріали мають певний рівень природної радіоактивності, правильно організований повітрообмін може значно зменшити обсяги радону в повітрі приміщень. Коливання активності радону у приміщенні можна розглянути на малюнку 1 та 2.

Оскільки, радон, це газ, що легко накопичується у закритих приміщеннях, тому ще на етапі проектування варто передбачити систему вентиляції, яка забезпечить постійний приплив свіжого повітря та видалення забрудненого. З метою зменшення радіоактивного проникнення використовують герметичні фундаменти, спеціальні радонозахисні плівки, гідроізоляція та вентиляційні канали під підлогою. Завдяки таким заходам радон виводиться ще до його потрапляння в житлову зону [3]. У житлових і виробничих приміщеннях важливою є не лише природна вентиляція, а й механічна, яка регулює ефективний повітрообмін [6]. Використання систем примусової вентиляції чи рекуперації дозволяє підтримувати оптимальний мікроклімат і значно знижувати рівень радону навіть у регіонах із високим його природним рівнем.

Таким чином, ретельно продумане архітектурне проектування та ефективна система вентиляції є не лише питанням комфорту чи енергоефективності, але й важливою складовою захисту людини від радіаційного впливу.

Результати експериментів та тематичні дослідження.

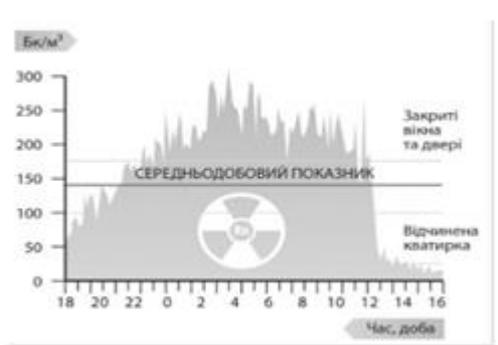


Рис. 1. Коливання активності радону у повітрі приміщення упродовж доби



Рис. 2. Коливання активності радону й повітрі приміщення упродовж місяця

Для вимірювання рівнів радону було використано радіометр Radon AlphaE (Radon Monitor), принцип роботи якого базується на прямому альфа-спектрометричному вимірюванні активності радону в повітрі з використанням напівпровідникового детектора.

Дослідження матеріалів (пісок, цемент, щебінь), які використовуються для виробництва плит, бруківки та бордюрного каменю, продемонстрували, що найбільший внесок у концентрацію радону в приміщеннях вносять дрібнодисперсні пористі фракції та мінерали з підвищеним вмістом урану і торію [2]. Це підтверджує необхідність проводити скринінг матеріалів ще на етапі вибору сировини, обираючи варіанти з нижчою природною радіоактивністю.

Експериментальні дослідження показали, що фізична обробка сировини, як-от просіювання, миття та ущільнення, дозволяє зменшити екзальтацію радону на 20–40 %. Додавання сорбентів і мінеральних добавок може знизити цей показник ще на 15–25 %. Поєднання цих методів дає змогу отримати матеріали з мінімальною газовою проникністю.

Результати показують, що застосування систем вентиляції, герметичних фундаментів і спеціальних бар'єрних плівок здатне зменшити рівень радону у внутрішньому повітрі на 50–70 %, навіть за умов використання матеріалів із природним рівнем радіонуклідів. Відтак, отримані результати свідчать, що контроль радону можливий на всіх стадіях, починаючи від вибору сировини і до закінчення будівельного процесу. Ефективність технологій залежить від поєднання фізичних, хімічних і конструктивних заходів. Це дозволяє не лише знизити ризики для здоров'я людей, але й забезпечити екологічну безпеку житлових і громадських будівель.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати свідчать про те, що використання технологій стримування радону й оптимізації вентиляції дозволяє досягнути концен-

трації газу, які відповідають встановленим державною нормам. Впровадження системного підходу, що охоплює вибір матеріалів і розробку архітектурних рішень, залишається ключовим для забезпечення радіологічної безпеки.

Висновки. Дослідження продемонструвало, що питання контролю радону у будівельних матеріалах має першорядне значення як з екологічної точки зору, так і для забезпечення санітарно-гігієнічних вимог. Радон є природним радіоактивним газом, який може накопичуватися у приміщеннях, створюючи загрозу для здоров'я, особливо якщо використовуються матеріали з високим вмістом радоновмісної сировини або виникають проблеми з вентиляцією. Результати дослідження підтверджують, що концентрація радону визначається не лише хімічним складом сировини, а й технологічними аспектами виробництва, фізичною структурою матеріалів, умовами експлуатації та архітектурними особливостями будівель. Найдієвішими методами мінімізації виділення радону є ретельний підбір сировини з низьким вмістом природних радіонуклідів, попереднє очищення матеріалів, ущільнення їхньої структури та впровадження спеціальних домішок, які знижують пористість. Поряд із цим, правильне планування конструкцій відіграє ключову роль – ефективна вентиляція, герметизація фундаментів і застосування радонозахисних бар'єрів допомагають запобігти накопиченню газу у приміщеннях. Такі підходи гарантують безпечне середовище для проживання. Отже, комплексний підхід до контролю радону – від етапу вибору сировини до стадії архітектурного проектування є важливим елементом створення екологічно безпечних архітектурних рішень та здорового життєвого простору. Отримані висновки можуть бути основою для вдосконалення будівельних стандартів, екологічного моніторингу та державного регулювання у сфері радіаційної безпеки.

Література

1. Друкований М. Ф., Очеретний В. П., Ковальський В. П., Чепуренко В. П. В'яжуче з відходів для дорожнього будівництва. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. Т. 1. С. 50-54.
2. Зубик С. В. Техноекологія. Джерела забруднення і захист навколишнього середовища: Навч. посібник. Львів: Оріяна-Нова, 2007. 17 с.
3. Ковальський В. П., Друкований М. Ф., Олійник Ю. Г. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві: Науково-технічний журнал*. 2023. № 1 (34). 190 с.
4. Очеретний В. П., Друкований О. М. Шляхи зниження радіактивності будівельних матеріалів та виробів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2011. № 1. С. 41-45.
5. Цигичко С. П. Оцінка критеріїв еколого-естетичної комфортності архітектурного середовища сучасних міст. *Науково-технічний збірник*. 2009. № 86. С. 421-429.
6. Kendall G. M., Smith T. J. Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection*, 2002. № 22. pp. 389-406
7. Etiope, G., & Martinelli, G. (2002). Migration of carrier and trace gases in the geosphere: an overview. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 129(3–4), 185–204.
8. Kendall, G. M., & Smith, T. J. (2002). Doses to organs and tissues from radon and its decay products. *Journal of Radiological Protection*, 22, 389–406.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ОРГАНІЧНЕ ВИРОБНИЦТВО ЯК НАПРЯМ «ЗЕЛЕНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ» СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА УКРАЇНИ

Петровська М.А., Петровський С.В.

Львівський національний університет імені Івана Франка
вул. Університетська, 1, 79000, м. Львів
petrovskamyr@gmail.com, sv.petrovskiy@gmail.com

Розуміння актуальності переходу з традиційних методів ведення сільського господарства на альтернативні, серед яких панівне місце належить органічному виробництву, має вирішальне значення не лише для сільськогосподарського сектору, але й для вирішення інших болючих питань, таких, як стійкість до зміни клімату, збереження біорозмаїття та здоров'я людини. Органічне виробництво, здатне дати відповіді на екологічні, економічні та соціальні виклики, є важливим у контексті європейської інтеграції України. Цьому сприяють удосконалення нормативно-правової бази у сфері органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції; введення Державного реєстру операторів, що здійснюють виробництво продукції відповідно до вимог законодавства у сфері органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції; Державного реєстру органів сертифікації у сфері органічного виробництва та обігу органічної продукції; Переліку органів іноземної сертифікації; покращення структури експорту аграрної продукції шляхом збільшення рівня переробки сировини та інвестування у створення агропромислових кластерів та виробничо-збутових ланцюгів тощо.

У статті наголошено на особливостях і перевагах органічного виробництва, з'ясовано значення терміну «органічний», подано дефініції поняття «органічне сільське господарство» на світових теренах наукової думки.

Оскільки органічне виробництво є сертифікованою діяльністю, яку провадять із дотриманням вимог законодавства, з'ясовано стандарти, на відповідність яким сертифіковано українську органічну продукцію в розрізі адміністративно-територіальних утворень України. Найбільша частка (31 %) припадає на стандарт «Органічне законодавство України», який дає можливість працювати на внутрішньому ринку.

Простежено динаміку загальної площі органічних сільськогосподарських угідь і кількості органічних операторів у розрізі адміністративно-територіальних утворень України. Здійснено кореляційний аналіз, обчисливши відносні показники: частку площі сільськогосподарських земель з органічним статусом у площі всіх сільськогосподарських земель і частку кількості операторів серед усіх сільськогосподарських виробників. Між цими відносними показниками коефіцієнт кореляції виявився досить низьким ($r = 0,19$), що не дає підстав говорити про кореляційний зв'язок.

За допомогою кластерного аналізу знайдено групи схожих об'єктів у вибірці, яких виокремлено п'ять. *Ключові слова:* органічне сільське господарство, законодавство, органічні стандарти, сертифікація, кластер.

Organic production as a direction of “green transformation” of agriculture in Ukraine. Petrovska M., Petrovskiy S.

Understanding the relevance of transitioning from traditional farming methods to alternative ones, among which organic production plays a dominant role, is crucial not only for the agricultural sector but also for addressing other pressing issues such as climate change resilience, biodiversity conservation, and human health. Organic production, which can respond to environmental, economic, and social challenges, is important in the context of Ukraine's European integration. This is facilitated by improvements to the regulatory framework for organic production, circulation, and labeling of organic products; the introduction of a State Register of operators engaged in the production of products in accordance with the requirements of legislation in the field of organic production, circulation, and labeling of organic products; a State Register of certification bodies in the field of organic production and circulation of organic products; the List of foreign certification bodies; improvement of the structure of agricultural exports by increasing the level of raw material processing and investing in the creation of agro-industrial clusters and production and distribution chains, etc.

The article highlights the features and advantages of organic production, clarifies the meaning of the term «organic», and provides definitions of the concept of «organic agriculture» in the global scientific community.

Since organic production is a certified activity carried out in compliance with legal requirements, the standards according to which Ukrainian organic products are certified in terms of administrative-territorial units of Ukraine are clarified. The largest share (31%) falls under the standard «Organic Legislation of Ukraine», which makes it possible to operate in the domestic market.

The dynamics of the total area of organic agricultural land and the number of organic operators in the context of administrative-territorial units of Ukraine were traced. A correlation analysis was performed by calculating relative indicators: the share of agricultural land with organic status in the total agricultural land area and the share of operators among all agricultural producers. The correlation coefficient between these relative indicators was quite low ($r = 0.19$), which does not give grounds to speak of a correlation.

Using cluster analysis, five groups of similar objects were found in the sample. *Key words:* organic farming, legislation, organic standards, certification, cluster.

Постановка проблеми. Як відомо, інтенсивне сільське господарство – це намагання отримати максимум продукції із наявних земельних площ при залученні значної кількості хімічних добрив,

пестицидів і регуляторів росту. Такий підхід має свої екологічні наслідки. Зокрема, мінеральні добрива, які використовують в інтенсивному рослинництві, часто змивають з полів дощові чи талі води, що

ників. Знайдено групи схожих об'єктів у вибірці за допомогою кластерного аналізу. З'ясовано стандарти, на відповідність яким сертифіковано українську органічну продукцію, зокрема, яку її частку маркують українським державним логотипом.

Методологічне або загальнонаукове значення.

У процесі дослідження використали загальнонаукові та спеціальні методи. Проаналізували існуючі наукові джерела і законодавчо-нормативну базу України. Історичний метод допоміг охарактеризувати основні етапи розвитку органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції. Графічні методи дослідження застосовано для отримання глибшого розуміння органічного виробництва в Україні. Логічні узагальнення використано при формулюванні висновків.

Викладення основного матеріалу. Слово «органічний» означає спосіб вирощування та оброблення сільськогосподарської продукції. Як відомо, органічну свіжу продукцію вирощують й обробляють без використання звичайних або синтетичних пестицидів, добрив, ГМО, опромінення, штучних ароматизаторів, барвників або консервантів. Органічне землеробство зосереджене на створенні здорових екосистем і здорового середовища, щоб культури могли рости без звичайних хімікатів [12]. Більшість українських вчених органічне сільське господарство асоціюють з виробництвом органічної сільськогосподарської продукції. На світових теренах наукової думки «органічне сільське господарство» – це модель виробництва натуральної продукції з оздоровчими властивостями, що ґрунтується на використанні біологічних та агротехнічних методів господарювання за встановленими правилами у визначених зонах [1]. Міжнародна федерація органічного сільськогосподарського руху (IFOAM) трактує органічне сільське господарство як виробничу систему, що підтримує здоров'я ґрунтів, екосистем і людей. Вона залежить від екологічних процесів, біологічної різноманітності та природних циклів, характерних для місцевих умов, при цьому уникають використання шкідливих ресурсів, які викликають несприятливі наслідки; поєднує в собі традиції, нововведення та науку з метою покращення стану навколишнього середовища і сприяння розвитку справедливих взаємовідносин і належного рівня життя для всього зазначеного вище [11]. Для більшості вчених цей термін означає практику, що має певні обмеження, заборони та вимоги. Зокрема, В. Шукалович стверджує, що це сертифікована діяльність, пов'язана з виробництвом сільськогосподарської продукції, яку провадять із дотриманням вимог законодавства у сфері органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції. Основними принципами органічного виробництва є використання методів дбайливих до навколишнього середовища та збереження ґрунту, відсутність використання ГМО, хімічно синтезованих речовин, поліплідних тварин

і т. д. [8]. У редакції закону України «Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції» [10] органічне виробництво – це сертифікована діяльність, пов'язана з виробництвом сільськогосподарської продукції [у тому числі всі стадії технологічного процесу, а саме первинне виробництво (включаючи збирання), підготовка, обробка, змішування та пов'язані з цим процедури, наповнення, пакування, переробка, відновлення та інші зміни стану продукції], що провадиться із дотриманням вимог законодавства у сфері органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції. Як бачимо, існують різні точки зору та підходи до визначення суті органічного сільського господарства, кожне з них, від стислого до академічного, так чи інакше відображає його зміст.

Статус органічного може отримати лише продукт, який пройшов весь шлях від поля чи ферми до прилавка з дотриманням низки вимог: органічні методи землеробства та тваринництва, органічна сировина, органічні компоненти та технологічний процес. Під контролем ТОВ «Органік Стандарт» станом на 20.07.2025 р. органічні оператори України отримали сертифікацію за 754 стандартами. Зауважимо, що один органічний оператор може отримати сертифікацію за кількома стандартами. Як видно з рис. 1, найбільша частка (31 %) припадає на стандарт «Органічне законодавство України», який дає можливість працювати на внутрішньому ринку України. Проте ще зовсім недавно в лідерах був Стандарт МАОС, еквівалентний Регламентам ЄС, частка якого становить 15 % і має тенденцію до зменшення, у зв'язку з набуттям з 1 січня 2022 року чинності Регламенту (ЄС) № 848/2018 (27 %) як основного базового документу, що описує правила органічного виробництва та маркування органічної продукції в ЄС, частка якого щодня зростає і ця тенденція збережеться у майбутньому.

Стандарти, за якими сертифіковано органічну продукцію операторів у розрізі адміністративно-територіальних утворень України подано в табл. 1.

Станом на 31.12.2023 року загальна кількість операторів становила 481, зокрема 383 сільськогосподарські виробники, сертифіковані за стандартом, що еквівалентний органічному законодавству ЄС та NOP (США), а операторів, сертифікованих відповідно до вимог законодавства України – 134 із загальної їхньої кількості 152. Динаміку кількості операторів у межах областей України відображено в табл. 3.

Аналізуючи абсолютні показники площ сільськогосподарських земель з органічним статусом і кількість операторів станом на 2021 рік у розрізі адміністративно-територіальних областей України, ми скористалися кластерним аналізом, основною метою якого є знаходження груп схожих об'єктів у вибірці. Зібрані дані упорядкували в порівняно



Рис. 1. Стандарти, на відповідність яким сертифіковано органічну продукцію України, станом на 20.07.2025 року

Джерело: складено авторами за [9]

Таблиця 1

Стандарти, на відповідність яким сертифіковано органічну продукцію України

Області	Стандарти	Стандарт МАОС, еквівалентний Регламентам ЄС	Допоміжні продукти для органічного виробництва	Bio Suisse	Органічне законодавство України	Регламент ЄС 2018/848	Європейська соя
Вінницька		9	3	1	38	41	3
Волинська		5	4	4	18	20	0
Дніпропетровська		2	1	1	7	7	0
Донецька		0	0	0	0	0	0
Житомирська		12	0	7	17	10	8
Закарпатська		5	1	0	3	6	1
Запорізька		0	1	0	2	5	0
Івано-Франківська		8	2	0	10	11	0
Київська		20	24	2	30	13	5
Кіровоградська (Кропивницький)		1	2	0	2	1	0
Луганська		0	0	0	0	0	0
Львівська		6	1	1	8	9	0
Миколаївська		3	1	1	7	5	0
Одеська		6	3	5	6	12	0
Полтавська		6	3	17	30	26	7
Рівненська		2	0	3	7	4	2
Сумська		7	0	0	9	2	1
Тернопільська		3	0	1	7	4	0
Харківська		5	5	0	10	7	0
Херсонська		0	3	0	0	0	0
Хмельницька		4	3	0	11	9	1
Черкаська		3	2	2	8	8	1
Чернівецька		1	0	0	1	3	0
Чернігівська		4	0	0	4	1	2
Україна		112	59	45	235	204	31

Джерело: пороховано авторами за [9]

Таблиця 2

Динаміка загальної площі сільськогосподарських земель (органічних і перехідного періоду), га

№	Територіальні одиниці, області	Роки					
		2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Вінницька	13 986	3 559	4 781	2 829	2 753	70 574
2	Волинська	3 849	4 564	4 840	10 720	5 182	5 210
3	Дніпропетровська	13 295	19 111	18 584	18 535	18 451	18 508
4	Донецька	69	69	59	0	0	0
5	Житомирська	32 196	37 623	29 289	38 665	36 796	37 457
6	Закарпатська	10 419	1 166	1 112	1034	1 600	41
7	Запорізька	7 902	40 433	44 539	44 125	32 072	32 241
8	Івано-Франківська	608	576	838	801	351	316
9	Київська	11 508	60 423	8 819	7 422	9 379	30 507
10	Кіровоградська (Кропивницький)	15 153	14 478	13 464	13 166	11 831	13 822
11	Луганська	0	0	0	0	0	0
12	Львівська	7 356	15 104	12 462	11 747	2 378	949
13	Миколаївська	4 655	9 430	213	1 653	1 598	1 956
14	Одеська	38 245	49 608	58 121	35 263	40 831	53 633
15	Полтавська	18 559	25 755	29 607	31 591	24 261	24 716
16	Рівненська	17 150	20 403	20 560	20 358	18 177	17 944
17	Сумська	96	85	378	85	50	48
18	Тернопільська	3 132	10 278	62 084	61 639	2 080	9 616
19	Харківська	13 491	4 578	3 824	3 773	3 808	4 093
20	Херсонська	66 479	84 540	81 695	61 667	29 413	23 114
21	Хмельницька	8 592	12 928	17 032	10 688	10 668	28 650
22	Черкаська	5 692	41 428	40 005	36 134	2 635	71 442
23	Чернівецька	11	190	190	190	190	199
24	Чернігівська	16 656	11 650	9 729	10 216	9 115	26 140
25	Україна	309 100	467 980	462 225	422 299	236 619	471 176

Джерело: сформовано авторами за [13]

однорідні групи, які називають кластерами. Кожен кластер складається зі схожих об'єктів [5]. Ми отримали 5 кластерів (рис. 2).

Аналізуючи площі сільськогосподарських земель з органічним статусом і кількість органічних операторів, ми здійснили кореляційний аналіз [2], обчисливши відносні показники: частку площі сільськогосподарських земель з органічним статусом у площах усіх сільськогосподарських земель і частку кількості операторів серед усіх сільськогосподарських виробників. Між цими відносними показниками коефіцієнт кореляції виявився досить низьким ($r = 0,19$), що не дає підстав говорити про кореляційний зв'язок.

Незважаючи на труднощі, органічне сільське господарство виявляє більшу стійкість у кризових ситуаціях, ніж традиційне, демонструючи меншу вразливість, ніж інтенсивне виробництво. Позитивним є те, що органічні оператори менше залежать від великих логістичних центрів, оскільки володіють різнома-

нітними каналами збуту, включаючи прямі продажі споживачам. У свою чергу, віддаленість логістичних центрів від виробничих потужностей і проблеми з паливом показали недосконалість довгих ланцюгів поставок у традиційному землеробстві [3].

Головні висновки. До 2019 року позначка «органічний» не була затверджена Законом, то ж будь-який виробник міг її використовувати, не дотримуючись принципів органічного виробництва. З прийняттям закону України «Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції» затверджено державний логотип для органічної продукції, що наноситься виключно на продукцію, вироблену відповідно до законодавства України. До норм ЄС українське законодавство наблизило введення в дію Реєстрів органів сертифікації та органічних операторів. Перехід органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції у правове поле сприятиме євроінтеграційному курсу України.

Динаміка кількості операторів України, одиниць

№	Територіальні одиниці, області	Роки					
		2018	2019	2020	2021	2022	2023
1	Вінницька	55	64	53	52	52	67
2	Волинська	22	19	21	27	20	30
3	Дніпропетровська	21	22	21	24	24	23
4	Донецька	1	1	1	0	0	0
5	Житомирська	43	34	27	26	24	26
6	Закарпатська	18	18	14	13	10	10
7	Запорізька	11	18	17	17	12	11
8	Івано-Франківська	11	11	13	16	14	16
9	Київська	89	83	70	73	68	58
10	Кіровоградська (Кропивницький)	16	12	10	6	5	7
11	Луганська	13	12	0	5	1	0
12	Львівська	32	32	32	27	21	21
13	Миколаївська	31	45	38	22	23	22
14	Одеська	41	40	44	37	40	38
15	Полтавська	28	27	30	31	33	32
16	Рівненська	22	22	20	22	18	15
17	Сумська	9	7	7	14	17	11
18	Тернопільська	13	10	10	11	8	9
19	Харківська	34	25	19	19	16	16
20	Херсонська	52	54	52	40	14	12
21	Хмельницька	31	25	21	17	18	21
22	Черкаська	17	16	13	17	12	20
23	Чернівецька	5	4	3	4	3	6
24	Чернігівська	20	16	8	8	9	10
25	Україна	635	617	549	528	462	481

Джерело: Сформовано авторами за [13]



Рис. 2. Органічні кластери України

Джерело: складено авторами за [13]

Перспективи використання результатів дослідження. Окрім забезпечення населення якісними та безпечними сертифікованими органічними продуктами харчування, органічне виробництво сприятиме протидії основним екологічним про-

блемам: зміні клімату, втраті біорозмаїття та екосистемних послуг, деградації земель, забрудненню повітря, води, ґрунту тощо; розвитку сільських територій, підвищенню зайнятості і добробуту населення.

Література

1. Артиш В.І. Організаційно-економічні передумови формування ринку екологічно чистої продукції в Україні. *Економіка АПК*. 2009. № 2. С. 117–120.
2. Грицевич В.С. Кореляційний та регресійний аналіз у суспільній географії: тексти лекцій. Львів, 2016. 24 с. URL: <https://surl.li/pbddvi>.
3. Громадська спілка «Органічна ініціатива» – інформаційний портал. URL: <https://organicinitiative.org.ua/news/organic-agriculture-more-resilience> (дата звернення 20.11.2023).
4. Інформаційний портал OrganicInfo. URL: <https://organicinfo.ua/stages/> (дата звернення 05.04.2024).
5. Кластерний аналіз. URL: <https://surl.li/htjtbf> (дата звернення 30.06.2025).
6. Лупенко Ю. О. Формування попиту та пропозиції на ринку органічної продукції. Органічне виробництво і продовольча безпека. Житомир: Полісся, 2013. С. 3–9.
7. Органік Стандарт. URL: <https://organicstandard.ua/standards> (дата звернення 09.10.2023).
8. Органічне виробництво: сучасний тренд чи майбутнє українського агросектору. *АгроЕліта: Всеукраїнський аграрний журнал*. 2021. URL: <http://surl.li/nrenj>.
9. Повний перелік операторів під контролем Органік Стандарт. URL: <https://organicstandard.ua/clients> (дата звернення: 20.07.2025).
10. Про основні принципи та вимоги до органічного виробництва, обігу та маркування органічної продукції: закон України від 10 липня 2018 року № 2496-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2496-19#Text> (дата звернення 21.11.2024).
11. Федерація органічного руху України – інформаційний портал. URL: <https://organic.com.ua/organichne-silke-gospodarstvo/> (дата звернення: 20.11.2023).
12. OPN. URL: <https://www.organicproducenetwork.com/article-education/4/whats-the-difference-between-organic-and-conventional> (дата звернення: 07.08.2024).
13. OrganicInfo, веб-портал. URL: <https://organicinfo.ua> (дата звернення 30.01.2023).

Дата першого надходження рукопису до видання: 06.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ВИДОВИЙ СКЛАД ТА ПОШИРЕННЯ В УКРАЇНІ СУМЧАСТИХ ГРИБІВ НА ОМЕЛІ ЗВИЧАЙНІЙ (*VISCUM ALBUM*: SANTALACEAE)

Андріанова Т.В.

Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного Національної академії наук України
вул. Терещенківська, 2, 01004, м. Київ
andrianova.tetiana@gmail.com

Актуальність дослідження грибів, пов'язаних з омелою звичайною (*Viscum album*), зумовлена потребою у розробці біологічних засобів контролю прогресуючого розповсюдження цього напівпаразита деревних порід і пошуком потенційних продуцентів біологічно активних речовин. Уперше узагальнено сучасні дані про поширення в Україні фітотрофних сумчастих грибів, які уражають два підвиди омели звичайної (*Viscum album* subsp. *album*, *V. album* subsp. *austriacum*). Матеріалом слугували власні польові та лабораторні дослідження, зразки з фунгарію KW-M і дані публікацій. Вперше після понад півстолітньої перерви виявлено нові місцезнаходження виду *Rhabdospora visci* у Волинській, Львівській та Рівненській областях, про який лише один раз повідомлялось для Черкаської області. Також зареєстровано у Київській області два нових для України види: *Plenodomus visci* та рідкісний *Septocyta visci-britannica*. Загалом встановлено, що мікобіота України нараховує сім видів сумчастих грибів, які уражають листки і гілочки *V. album*: *Botryosphaeria visci*, *Dichomera rhamnicola*, *Nectria cinnabarina*, *P. visci*, *R. visci*, *S. visci-britannica* та *Trichothecium roseum*. Подано описи морфологічних особливостей грибів на основі українських зразків, наведено відомості про їх знахідки в Україні та рослини-живителі напівпаразита *V. album*. Підсумовано дані щодо сучасного географічного поширення вивчених видів грибів з урахуванням синонімічних назв, що розшило уявлення про їх дійсні ареали, обмежені поширенням рослини-живителя та їх сумісною міграцією через екологічні зміни. Показано, що вид *B. visci* на сьогодні відомий в Азії, Африці, Європі та Північній Америці, *P. visci* – у Африці та Європі, *R. visci* – у Азії та Європі, а види *D. rhamnicola* і *S. visci-britannica* були знайдені лише у кількох країнах Європи. На основі вивчених матеріалів пропонується використовувати у розробці біологічних методів боротьби з інвазією *V. album* не лише гемібіотроф *B. visci*, але й інші вузькоспеціалізовані фітопатогени *P. visci*, *R. visci*, а також *D. rhamnicola*, які індукують імунологічну реакцію у рослини-живителя. **Ключові слова:** біорізноманіття, *Botryosphaeria*, *Dichomera*, *Rhabdospora*, *Plenodomus*, *Septocyta*.

Species composition and distribution of ascomycetes on European mistletoe (*Viscum album*: Santalaceae) in Ukraine. Andrianova T.

The relevance of studying fungi associated with European mistletoe (*Viscum album*) is driven by the need to develop biological control agents for the progressive spread of this tree semi-parasite and to search for potential producers of biologically active substances. This research provides the first comprehensive summary of current data on the distribution in Ukraine of phytophagous ascomycetes that infect two subspecies of European mistletoe (*V. album* subsp. *album* and *V. album* subsp. *austriacum*). The material for this study included original field and laboratory investigations, samples from the KW-M fungarium, and published data. For the first time in over half a century, new localities in Lviv, Rivne, Volyn regions were discovered for *Rhabdospora visci*, which had been previously reported only once from the Cherkasy region. Additionally, two species new to Ukraine were recorded in Kyiv region: *Plenodomus visci* and the rare *Septocyta visci-britannica*. It was established, in general, that the mycobiota of Ukraine includes seven species of ascomycetes that cause damage to the leaves and twigs of *V. album*: *Botryosphaeria visci*, *Dichomera rhamnicola*, *Nectria cinnabarina*, *P. visci*, *R. visci*, *S. visci-britannica*, and *Trichothecium roseum*. The study provides descriptions of the morphological characters of these fungi based on Ukrainian samples, along with information on their observation in Ukraine and host plants of the semiparasite *V. album*. This research also synthesizes current data on the geographical distribution of the studied species of fungi, accounting for their synonyms. This expanded understanding of their true distribution areas, which are limited by the outspread of the host plant and their joint migration due to ecological changes. It has been demonstrated that *B. visci* currently has a distribution across Asia, Africa, Europe, and North America; *P. visci* is found in Africa and Europe; *R. visci* occurs in Asia and Europe; while the species *D. rhamnicola* and *S. visci-britannica* have only been recorded in a few European countries. Received data testify that design of biological control against *V. album* invasion should be based not only the hemibiotroph *B. visci* but also the other highly specialized phytopathogens *P. visci*, *R. visci*, as well as *D. rhamnicola*, that induce immunological reaction in the host plant. **Key words:** biodiversity, *Botryosphaeria*, *Dichomera*, *Rhabdospora*, *Plenodomus*, *Septocyta*.

Постановка проблеми. Моніторинг стану природних екосистем і зелених насаджень є надзвичайно важливим завданням, оскільки він дозволяє вчасно виявити та оцінити розвиток фітопатогенів, які пригнічують ріст рослин чи призводять до їх загибелі.

Особливу наукову зацікавленість становить вивчення складних гіперпаразитичних відносин. Мова йде про взаємодію між деревною рослиною-господарем, паразитичною чи напівпаразитичною рослиною, яка на ній оселяється, та гіперпаразитами цієї пара-

зитичної рослини. Саме ці гіперпаразитичні організми можуть відігравати ключову роль у контролі поширення рослин-паразитів, допомагаючи значно знизити рівень ураження, пригнічення та всихання дерев. Такий підхід є перспективним у сучасній фітопатології та екології, оскільки він спрямований на розкриття складних екологічних зв'язків і пошук потенційних біологічних засобів для управління станом лісових і міських насаджень, що особливо важливо в умовах зростаючого антропогенного тиску та кліматичних змін. У цьому контексті, вивчення поширення та особливостей грибів-фітопатогенів омели (*Viscum album* L.) є необхідним для визначення можливостей їхнього потенційного використання у контролі її розвитку, що має практичне значення для ландшафтного дизайну, садівництва та збереження здоров'я лісів в Україні.

Актуальність дослідження. Рід *Viscum* L. (родина *Santalaceae*) об'єднує понад 113 визнаних видів вічнозелених напівпаразитів, які розвиваються у симбіозі з 452 видами деревних рослин [1]. Серед них *Viscum album* L. є поширеним видом з середземноморсько-європейсько-південноазійським природним ареалом, та інтродукований на заході США, в Ірландії й Японії. В Україні цей вид найчастіше трапляється у Лісостепу, Лівобережному Злаково-Лучному Степу, Прикарпатті, а останніми роками у Поліссі та Карпатах [2-4]. Зареєстровані в Україні три підвиди *V. album* (*V. album* subsp. *album* L., *V. album* subsp. *abietis* (Wiesb.) Abrom., *V. album* subsp. *austriacum* (Wiesb.) Vollm.) уражують близько 30 видів дерев і кущів родів *Abies*, *Acer*, *Betula*, *Celtis*, *Crataegus*, *Fraxinus*, *Juglans*, *Malus*, *Pinus*, *Populus*, *Prunus*, *Quercus*, *Robinia*, *Salix*, *Sorbus*, *Tilia* та ін. [3-9].

Масове поширення *V. album* спричиняє значні екологічні та господарські збитки, що виражається у пригніченні росту, передчасному всиханні дерев і зниженні декоративної цінності насаджень. Негативний вплив зумовлений продукуванням комплексу біологічно активних речовин – флавоноїдів, лектинів, поліпептидів (віскотоксину і вісколу), тритерпенових кислот (олеанолової, бетулінової) та інших сполук, які, поряд із фітотоксичною дією, мають і підтверджені фармакологічні властивості [10-12]. Препарати на основі *V. album* застосовують у медицині, однак їх промислове виробництво потребує значних обсягів рослинної сировини отриманої з певних рослин-господарів і значних термінів її відбору, що істотно обмежує можливості цієї технології. Перспективним напрямом вирішення проблеми є вивчення грибів, асоційованих у розвитку з *V. album*. Доведено, що частина з них, зокрема ізольовані з рослинних тканин ендofіти *Bulgaria inquinans* (Pers.) Fr., *Asoergillus flavus* Link, *Fusarium oxysporum* Schltdl., *F. verticillioides* (Sacc.) Nirenberg і *Trichothecium* sp., здатні синтезувати біохімічні сполуки, подібні до метаболітів рослин роду *Viscum*,

у тому числі з протипухлинними властивостями [13, 14]. Культивування таких грибів *in vitro* створює передумови для економічно й екологічно доцільного отримання цінних лікарських речовин.

Окрему наукову і практичну значущість має пошук біологічних методів контролю поширення *V. album*. У ряді країн (Великобританія, Польща, Сербія, Туреччина, Україна) проведено дослідження різних фітопатогенних грибів цього напівпаразита [15-23], проте ефективні біопрепарати на їх основі досі не розроблено у зв'язку з високим рівнем захисних механізмів *V. album*, зокрема синтезом віскотоксину та інших речовин [18, 22, 24].

Таким чином, актуальність вивчення асоційованих грибів визначається двома критично важливими аспектами пов'язаними з *V. album*, як небезпечним напівпаразитом, що потребує біологічного контролю, а з іншого боку – як джерела цінних біологічно активних сполук і резервату мікроорганізмів, можливих їх продуцентів. В Україні, попри поширеність проблеми, немає систематичних досліджень та зведених і узагальнених даних щодо видового складу грибів, пов'язаних у розвитку з *V. album*. Таким чином, актуальність полягає у створенні системної основи для подальших біотехнологічних та екологічних рішень шляхом комплексного вивчення та узагальнення по грибах на *V. album* на території України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх десятиліть кількість наукових праць, присвячених видам роду *Viscum* та асоційованим із ними організмам, істотно зростає. Зокрема, цифрова бібліотека Міжнародного центру сільського господарства та біологічних наук (CABI Digital Library) містить 1671 публікацію (з 1915 року), присвячену цим напівпаразитам, їх застосуванню та патогенам, що на них розвиваються; водночас безпосередньо патогени *Viscum* згадуються лише у 65 статтях [25]. На сьогодні встановлено 53 види грибів, розвиток яких пов'язаний із *V. album* [3, 16, 18, 21, 23], переважно ендofітів, ідентифікованих методами молекулярно-генетичного аналізу. Разом із тим повідомляється про відносно невелику кількість спеціалізованих фітотрофних сумчастих грибів. По чотири види зафіксовано у Великій Британії – *Botryosphaeria visci* (Kalchbr.) Arx & E. Müll., *Plenodomus visci* (Sacc.) Gruyter, Aveskamp & Verkley, *Rhabdospora visci* (Bres.) Kuntze та *Septocytia visci-britannica* Punith. & Spooner [21], та у Польщі – *B. visci*, *Cylindrodendrum orthosporum* (Sacc. & P. Syd.) L. Lombard, *P. visci* та *Septoria krystynae* Ruszk. -Mich., Janik-Superson, Piskorski, Wołkowyci [23]; у Сербії відзначено 22 види [16]. Досить активно розвивається вивчення мікобіоти Туреччини [18], де серед 13 ізолятів, отриманих із тканин *V. album*, ідентифіковано 7 видів, що належать переважно до ґрунтових грибів і контамінантів повітря. Серед патогенних фітотрофів, окрім *B. visci*,

виявлено також рідкісні види – *Aureobasidium harposporum* (Bres. & Sacc.) Herm. -Nijh. та *R. visci* [19, 26, 27].

В Україні спеціальні дослідження видового складу грибів на *V. album* тривалий час не проводились. Лише у працях, присвячених мікобіоті окремих територій, повідомлялось про знахідки *B. visci*, *Dichomera rhamnicola* (Cooke) B. Sutton & Dyko, *Nectria cinnabarina* (Tode) Fr. та *R. visci*, дані про які наводились під різними синонімічними назвами [28-35]. Новий етап інтересу до вивчення патогенів *V. album* в Україні розпочався у XXI ст., коли з'явилися відомості про реєстрацію окремих видів грибів та дослідження їх у чистих культурах. Найбільша кількість публікацій стосувалась сумчастого гриба *B. visci* [22, 36-42].

Мета роботи – виявити та уточнити видовий склад фітотрофних сумчастих грибів на *V. album* в Україні, а також отримати сучасні дані про їх поширення, рідкісність, ступінь ураження рослин та основні морфологічні особливості виявлених видів, узагальнити дані про асоційовані деревні рослини на яких розвивались ці гіперпаразити.

Новизна дослідження. Вперше в умовах України визначено наявний тасономічний склад фітотрофних сумчастих грибів на *V. album*, особливості трапляння цих грибів та деревні рослини-господарі, на яких *V. album* уражувався грибами. Отримано дані щодо прояву морфологічних особливостей зареєстрованих видів грибів на основі вивчення українських зразків, встановлена їх рідкісність на основі узагальнення поширення, визначено перспективні види для досліджень з розробки біологічних препаратів.

Матеріали і методи роботи. Основу роботи складають матеріали уражених грибами рослин виду *Viscum album* L. зібрані автором маршрутно-експедиційним методом на Поліссі та у Лісостепу України у 2012-2024 роках. Також проаналізовано і вивчено зразки грибів із фунгарію Національного гербарію Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (KW-M), зібрані різними колекторами з усієї території України у XX-му сторіччі. Мікроскопічні препарати грибів вивчали під бінокляром і світловим мікроскопом у 5% водному розчині молочної кислоти та 1% розчині бавовняного синього у лактофенолі. В окремих випадках ідентифікація деяких видів грибів уточнювалась при вивченні їх структур під скануючим електронним мікроскопом JEOL JSM-6060 LA. Підготовлений список сумчастих грибів, що розвиваються на *V. album* в Україні, включає назви видів грибів та їх синоніми, описи діагностичних структур, відомі асоційовані рослини, на яких паразитувала *V. album*, місця і дати зборів вивчених зразків, які подано за районуванням «Флори грибів України» [43], прізвища колекторів та посилання на публікації, де була оприлюднена інформація. До списків видів включено матеріали повідомлень попе-

редніх дослідників, які містили дані щодо локацій і часу знаходження грибів на рослинах роду *Viscum* в Україні. Здійснено уточнення українських даних, поданих на сайті *Cybertruffle's Robigalia* [44]. Для узагальнення поширення у світі представлених видів грибів використано інформацію мікологічних монографічних видань і зведень видового складу грибів для різних країн, а також міжнародну базу даних GBIF [45] і попередні відомості з міжнародної бази по фітопатогенних грибах Сільськогосподарської Дослідницької Служби USDA [26] та її нової версії [46]. Назви видів грибів наведено відповідно до сучасних уявлень про їх номенклатуру і баз даних *Mycobank* [47] або *Index Fungorum* [48]. Наводяться синонімічні назви встановлених видів грибів, так як відомості щодо них часто були представлені під різними назвами чи останнім часом відбувся перегляд їх систематичного положення.

Виклад основного матеріалу. Встановлено, що в умовах України на листі та стеблах *Viscum album* розвиваються сім видів сумчастих грибів, що спричиняють ураження та формують спороношення. Вид *Botryosphaeria visci* (Kalchbr.) Arx & E. Müll. зумовлює хвилеподібні епіфітотії *V. album*, одна з яких спостерігається останніми роками на території Київської області. Даний вид є одним із найпоширеніших в Україні. Рідкісний вид *Rhabdospora visci* (Bres.) Kuntze, відомий раніше лише з одного локалітету Черкаської області (1944-1945), нещодавно повторно виявлений на основі власних зборів різних років: Рівненському природному заповіднику (2019), і Національному природному парку «Прип'ять-Стохід» (2020), а також у Державному історико-культурному заповіднику «Нагуєвичі» (Львівська обл., 2021). Крім того, вперше для мікобіоти України зареєстровано нові види – *Plenodomus visci* (Sacc.) Gruyter, Aveskamp & Verkley та *Septocytia visci-britannica* Punith. & Spooner, виявлені у різних екотопах Київської області.

Дослідження базувалися на зразках із Вінницької, Волинської, Київської, Львівської, Полтавської, Івано-Франківської, Рівненської та Черкаської областей. Окрім власних зборів, використано матеріали, зібрані відомими мікологами: Г.Ф. Борисевичем, А.С. Бухало, А. Вроблевським, В.П. Гелютою, З.К. Гіжицькою, В.П. Гродзінською, М.Я. Зеровою, З.Г. Лавітською, Г.С. Неволовським, К. Пилипенко, М.М. Підоплічко. Ураховано також повідомлення А.О. Потєбні і В.М. Черняєва, а в сучасних дослідженнях – О.Ю. Акулова, Ю.О. Білоножко, Я.Ю. Бублик, Д. Гарбуза, А. Новгородського, що відображені у відповідних публікаціях [22, 28, 37, 38, 41, 42, 49].

Нижче подано результати власних досліджень та узагальнені наявні дані щодо видів сумчастих грибів, виявлених в Україні, відповідно до їхнього положення в сучасній системі грибів.

Відділ Ascomycota
Клас Dothideomycetes
Порядок Botryosphaeriales
Родина Botryosphaeriaceae

1. *Botryosphaeria visci* (Kalchbr.) Arx & E. Müll., *Beitr. Kryptfl. Schweiz* 11(1): 41 (1954). (Рис. 1). – *Dothidea visci* Kalchbr., *Hedwigia* 8: 117 (1869). – *Anthostomella visci* (Kalchbr.) Sacc., *Syll. Fung.* (Abellini) 1: 293 (1882). – *Anthostoma visci* (Kalchbr.) Sacc., *G. Bot. Ital.*, n.s. 23(2): 224 (1916). –

Phaeobotryon visci (Kalchbr.) Höhn., *Sber. Akad. Wiss. Wien, Math.-naturw. Kl.*, Abt. 1 128(7-8): 591 (1919). – *Phaeobotryosphaeria visci* (Kalchbr.) A.J.L. Phillips & Crous, in Phillips, Alves, Pennycook, Johnston, Ramaley, Akulov & Crous, *Persoonia* 21: 47 (2008). –

Sphaeria atrovirens var. *visci* Alb. & Schwein., *Consp. Fung.* (Leipzig): 48 (1805). – *Sphaeria visci* (Alb. & Schwein.) DC., *Fl. Franç.*, Edn 3 (Paris) 5/6: 146 (1815). – *Diplodia visci* (Alb. & Schwein.) Fr., *Summa Veg. Scand.*, Sectio Post. (Stockholm):

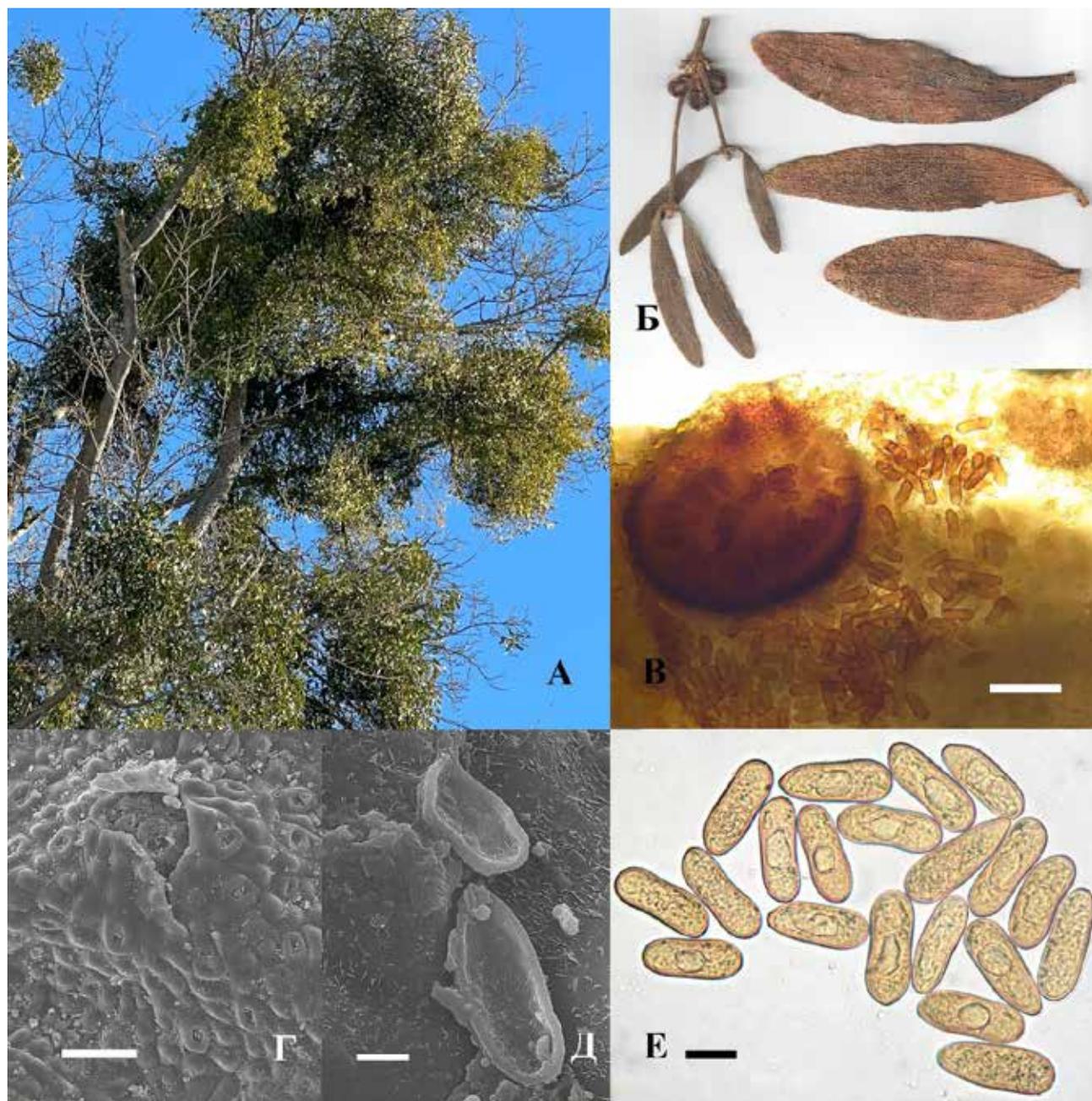


Рис. 1. Особливості гриба *Botryosphaeria visci* на *Viscum album*

А – напівпаразит *V. album* на *Fraxinus excelsior*; уражений *B. visci*, Б – листя з плодовими тілами гриба, В – поперечний розріз конідіями макроконідіальної анаморфа з конідіями, Г – конідіома, що проривається через тканини листка (СЕМ), Д – конідії на поверхні листка (СЕМ), Е – зрілі конідії гриба з краплями олії. Значення масштабної лінійки: В, Г – 100 мкм, Д – 10 мкм, Е – 20 мкм.

417 (1849). – *Ceuthospora visci* (Alb. & Schwein.) Sollm., *Hedwigia* 2: 189 (1863). – *Sphaeropsis visci* (Alb. & Schwein.) Sacc., *Michelia* 2(6): 105 (1880). – *Microdiplodia visci* (Alb. & Schwein.) Potebnia, *Annales Mycologici* 8(1): 63 (1910). – *Ascochyella visci* (Alb. & Schwein.) Petr., *Annales Mycologici* 23(1/2): 111 (1925). – *Botryosphaerostroma visci* (Alb. & Schwein.) Petr., *Annales Mycologici* 23(1/2): 111 (1925). – *Botryosphaerostroma visci* (Alb. & Schwein.) Petr., *Beih. Rep. Spec. Nov. Regn. Veg.* 42: 127 (1926) [1927]. – *Pseudodiplodia visci* (Alb. & Schwein.) Petr., *Sydowia* 7(5-6): 304 (1953). – *Metadiplodia visci* (Alb. & Schwein.) Zambett., *Bull. Trimest. Soc. Mycol. Fr.* 70(3): 295 (1955) [1954]. –

Gibberidea visci Fuckel, *Jahrb. Nassau. Ver. Naturk.* 23-24: 168 (1870) [1869-70]. – *Camarosporium visci* (Fuckel) Sacc., *Syll. Fung.* (Abellini) 3: 463 (1884). –

Macrophoma visci Aderh., *Arb. Biol. Anst. Land-u. Forstw.* 4: 462 (1905). –

Sphaeropsis visci f. *microspora* Unamuno, *Boletín Real Soc. Españ. Hist. Nat., Biologica* 30: 430 (1930).

Плями часто відсутні. Телеоморфа. Плодові тіла псевдотеціальні асками, темно-коричневі, занурені, розташовані по-одиноці, до 400 мкм у діаметрі, з остіоллю, товстостінні, стінка складається з кількох шарів темно-коричневих шарів *textura angularis*. Псевдопарафізи безбарвні, гладкі, 4–6 мкм завширшки, з перетинками. Аски бітунікатні, 8-спорові, товстостінні, з товстою ендотунікою та розвиненою апікальною камерою і ніжкою, 180–200 × 32–45 мкм. Аскоспори світло-коричневі, одноклітинні, еліпсоїдальні та яйцеподібні, (27,5–)31–37,5(–38,5) × 15–17 мкм, гладенькі, іноді з невеликим апікулом на обох кінцях.

Анаморфа макроконідіальна. Конідіоми пікнідіальні, занурені та згодом прориваються на поверхню, кулясті та напівкулясті, однокамерні, (180–)200–280(–330) мкм у діаметрі, стінка складається з кількох шарів темно-коричневої *textura angularis*, нерівномірної товщини, 18–30 мкм, остіола центральна. Парафізи безбарвні, без перегородок, тонкостінні, 30–60 × 3–4 мкм, з трохи розширеною верхівкою до 5 мкм. Конідіогенні клітини вистилають порожнину конідіоми, безбарвні, глобластичні, які формують конідії шляхом перкуррентних енетеробластичних проліферацій, виокремлені, глечиковидні та циліндричні, 6–9(–11) × 3–4 мкм. Конідії від світло-оливкових до темно-оливково-коричневих, 30–44(–53) × (14–)16–20(–23) мкм, еліпсоїдально-видовжені або булавоподібні, одноклітинні, верхівка притуплена і заокруглена, основа притуплена або усічена, товстостінні, іноді трохи перетянуті у центральній частині, зовні гладкі, всередині дрібно-гранульовані.

Анаморфа мікроконідіальна. Конідіоми пікнідіальні, скупчені, занурені, кулясті, однокамерні, 80–120 мкм у діаметрі, темно-коричневі, тонкостінні, з невеликим виступаючим центральним устям.

Конідіогенні клітини безбарвні, глобластичні, бочковидні, 4–5 × 3–4 мкм. Конідії від світло- до темно-коричневих, 9–10 × 3,5–4,0(–5) мкм, яйцеподібні та еліпсоїдальні, гладкі, одноклітинні чи з 1 перегородкою.

Загальне поширення на *Viscum album* L. Азія: Грузія, Індія, Китай, Пакистан, Туреччина. Північна Америка: США. Африка: Ефіопія, Єгипет. Європа: Австрія, Бельгія, Болгарія, Великобританія, Греція, Данія, Іспанія, Італія, Литва, Люксембург, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Польща, Росія, Румунія, Сербія, Словаччина, Словенія, Угорщина, Україна, Фінляндія, Франція, Хорватія, Чехія, Швейцарія, Швеція.

Поширення в Україні (Рис. 2). На листках і гілочках *Viscum album* L. subsp. *album*:

Західне Полісся. Волинська обл., Камінь-Каширський р-н, НПП «Прип'ять-Стохід», околиці с. Невір, берег озера Біле, березовий гай, на *Betula pendula*, 07.10.2020 (Андріанова) [39]; Рівненська обл., Сарненський р-н, біля селища Клесів, Рівненський природний заповідник, масив Сомино, біля озера Сомино, сосновий ліс, на *Pinus sylvestris*, 13.06.2019 (Андріанова) [40]. – **Правобережне Полісся.** м. Київ, Подільський р-н, Куренівка, розсадник тресту зеленого будівництва, 25.04, 28.04.1939 (Лавітська, Зерова); 05.05.1939 (Лавітська). – **Західноукраїнські Ліси.** Львівська обл., Золочівський р-н, НПП «Північне Поділля» (Новгородський) [42]. – **Карпатські Ліси.** Івано-Франківська обл., Коломийський р-н, околиці с. Іванівці та с. Княздвір, 05.1913 (Вільчинський) [29]; Івано-Франківська обл., Косівський р-н, околиці с. Пістинь, ліс, 06.1914 (Вроблевський) [30]. Львівська обл., Стрийський р-н, НПП «Сколівські Бескиди», 03.05.2017 (Бублик) [38]. – **Західний Лісостеп.** м. Вінниця, парк, 03.05.1926 (Борисевич); Тернопільська обл., Чортківський р-н, Природний заповідник «Медобори» (Новгородський) [42]. – **Правобережний Лісостеп.** м. Київ, Шевченківський р-н, Ботанічний сад ім. акад. О.В. Фоміна КНУ, 18.08.1924 (Гіжицька); 03.05.1931 (Пилипенко); на *Fraxinus excelsior*, 03.03.2023, 09.03.2024 (Андріанова); 28.03.2024 (Гелюта); вул. Скоропадського, на *Acer platanoides*, 07.03.2024 (Андріанова). м. Київ, Голосіївський р-н, острів Водників, 05.09.1972 (Лавітська); НПП Голосіївський, урочище Лісники, 28.04.1973 (Лавітська); урочище Церковщина, хутір Вільний, 05.05.1973 (Лавітська); вул. Байкова, Байкове кладовище, на *F. excelsior*, 07.10.2012 (Андріанова); Національний комплекс «Експоцентр України», насадження, *A. platanoides*, 03.02.2018 (Андріанова); ясенево-дубово-кленовий ліс, біля рукава річки Віта, на *Quercus robur*, 25.04.2019 (Андріанова); ясенево-дубово-кленовий ліс, НПП Голосіївський, урочище Лісники, околиці санаторію «Конча-Заспа», на *Q. robur*, 25.04.2019 (Андріанова); НПП



Рис. 2. Місяця реєстрації *Botryosphaeria visci* на *Viscum album* в Україні

Голосіївський, Голосієве, околиці монастиря, на *F. excelsior*, 14.12.2024 (Андріанова). Київська обл., Обухівський р-н, околиці с. Підгірці, садівниче товариство, сад, 04.05.1973 (Лавітська); околиці с. Рудики, на *Malus domestica*, 10.07.2024 (Андріанова); Білоцерківський р-н, м. Біла Церква, парк, 16.04.1927 (Гродзінська) [31]; 16.05.1927 (Підоплічко); Державний дендрологічний парк «Олександрія», мішане насадження, на *A. platanoides*, 18.09.2024 (Андріанова). Soc. *Plenodomus visci* (Sacc.) Gruyter, Aveskamp & Verkley. Черкаська обл., Черкаський р-н, м. Сміла, 15.02.1914, 07.04.1915, 20.04.1915 (Неводовський); Звенигородський р-н, с. Козацьке, 10.09.1925 (Підоплічко); околиці м. Канів, 23.04.1945 (Лавітська) [32]; Канівський природний заповідник, 1944-1945 (Лавітська) [33, 50]; Канівський р-н, Регіональний ландшафтний парк «Трахтемирів», акацієвий ліс, *Robinia pseudoacacia*, 13.04.2008 (Гелюта). – **Лівобережний Лісостеп.** Полтавська обл., Полтавський р-н, околиці сел. Диканька, ліс, 06.06.1958 (Бухало) [34]. – **Харківський Лісостеп.** м. Харків, 16.04.1836 (Черняєв) [28]; м. Харків та околиці, 2019–2023 (Новгородський) [42]; Харківська обл., Харківський р-н, околиці сел. Буди, урочище Муховате, 2023–2024 (Новгородський) [42]; Зміївський р-н, околиці с. Коропове, НПП «Гомільшанські ліси» [36]. Сумська обл., Охтирський р-н, НПП «Гетьманський», 09.10.2019 (Гарбуз) [41]; Сумська

обл., на *Sorbus aucuparia*, 08.2021 (Білоножко) [22]. – **Донецький Злаково-Лучний Степ.** Донецька обл., Краматорський р-н, НПП «Святі гори», 10.03.2007 (Акулов) [37]. – **Гірський Крим.** Республіка Крим, Феодосійський р-н, околиці м. Старий Крим, монастир Сурб-Хач, 23.07.1990 (Ісіков) [44].

На листках і гілочках *Viscum album* subsp. *austriacum* (Wiesb.) Vollm.:

Правобережний Лісостеп. м. Київ, Печерський р-н, Національний ботанічний сад ім. М.М. Гришка НАН України, на *P. sylvestris*, 31.03.2023 (Андріанова); Голосіївський р-н, НПП Голосіївський, урочище Лісники, сосновий ліс, на *P. sylvestris*, 02.12.2023 (Андріанова), Soc. *Mucor circinelloides* Tiegh. Київська обл., Обухівський р-н, околиці сел. Козин, сосновий ліс, на *P. sylvestris*, 10.07.2016, 12.05.2022. Soc. *Septocyta visci-britannica* Punith. & Spooner, 03.04.2024, 24.07.2024 (Андріанова); с. Плюти, сосновий ліс, на *P. sylvestris*, 16.04.2023 (Андріанова).

Встановлено, що гриб *Botryosphaeria visci* згідно наявних публікацій різних років і баз даних є космополітом, поширеним не тільки на Європейському континенті, але й відомий у Азії, Африці та Америці. Гриб має статеву і безстатеві морфи, що ускладнювало його ідентифікацію та розуміння об'єму виду, зумовило чисельні зміни його назви. Століття тому А. Потебня [28] та Г. Дідіке [51] вважали, що *Microdiplodia visci* (із синонімічною назвою *Diplodia visci*) є анаморфною мікроконідиальною стадією

розвитку гриба, який має анаморфну макроконідиальну стадію *Sphaeropsis visci*, і обидві стадії пов'язані у розвитку із статевою морфою – телеоморфою *Gibberidea visci*. Погляд на наявність різних морф у цього виду гриба загалом підтримувався і деякими подальшими дослідниками [49, 52, 53]. Нещодавно на підставі вивчення проростання аскоспор у чистій культурі та молекулярно-філогенетичного аналізу було підтверджено зв'язок між телеоморфою й анаморфою цього виду, які розвиваються на *Viscum album*, а також приналежність його до родини *Botryosphaeriaceae* [37, 49, 54, 55]. На основі телеоморфи, що вивчалась *in vitro*, було запропоновано нову назву для гриба – *Phaeobotryosphaeria visci* [37], яка пізніше була визнана синонімічною. Подальші дослідження морфології зразка гриба із Німеччини під назвою *Gibberidea visci* з Гербарію біології рослин Іллінойського університету (ILL) підтвердили його конспецифічність із анаморфою *Sphaeropsis visci* [54], що підтримало широке розуміння цього виду, заснованого на кількох типах. Проте до цього часу перелік синонімічних назв повністю не узгоджено і у різних публікаціях з'являються трохи відмінні трактування об'єму виду.

В Україні даний вид гриба *B. visci* зареєстровано під назвами *Botryosphaerostroma visci*, *Gibberidea visci*, *Microdiploia visci*, *Sphaeropsis visci*, та останнім часом – *Botryosphaeria visci* та *Phaeobotryosphaeria visci*. Знахідки гриба *B. visci* відомі від 1836 року (В.М. Черняєв, Харків), на початку ХХ сторіччя основними колекторами були Т. Вільчинський, А. Вроблевський, Г.С. Неводовський, М.М. Підоплічко, А.О. Потєбня, а пізніше – Г.Ф. Борисевич, З.К. Гіжицька, В.П. Гродзінська, З.Г. Лавітьська, К. Пилипенко. У Право- і Лівобережному Лісостепу України мікологи А.С. Бухало та З.Г. Лавітьська реєстрували цей вид і у 50–70 роках ХХ стріччя. Розвиток епіфітотії 2010–2020 років зумовив зростання інтересу до *B. visci*, колекторами стають численні дослідники, як то В.П. Гелюта, О.Ю. Акулов, Т.В. Андріанова, Ю. Білоножко, Я.Ю. Бублик, Д. Гарбуз, А. Новгородський та ін. Гриб поширений у Правобережному Поліссі, Лісостепу, Карпатах і Гірському Криму, а також у Донецькому Злаково-Лучному Степу. Найбільше знахідок *B. visci* у лісостепових районах, проте вірогідно, що ареал цього виду значно ширший в Україні, так як не всі території були охоплені обстеженнями. У більшості випадків гриб продукував численні плодові тіла, та масово розвивався на опалих кущиках на *V. album*, що якийсь період пролежали на ґрунті.

Встановлено, що в Україні гриб *B. visci* розвивається на *Viscum album*, яка уражує *Acer platanoides* L., *Betula pendula* Roth, *Fraxinus excelsior* L., *Malus domestica* (Suckow) Borkh., *Pinus sylvestris* L., *Quercus robur* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Sorbus aucuparia* L. Особливості морфології гриба *B. visci*, що поши-

рений в Україні, розглянуто при вивченні 28 зразків зібраних на *Viscum album* subsp. *album* та 7 зразків гриба зібраних на *V. album* subsp. *austriacum*. Значне число зразків представляють конідиальну стадію розвитку гриба. Відмічено певну варіабельність розмірів конідій, які є одними із самих стабільних структур. Товстішими були конідії зі зборів у липні-листопаді (до 23 мкм) та тоншими – у лютому (14–17 мкм).

Цей вид, що є гіперпаразитом, пропонують застосовувати для біологічного контролю *Viscum album* [16, 17, 20, 22, 23]. Слід однак зважати, що гемібіотрофний тип живлення гриба *B. visci* може бути на заваді, у зв'язку з чим паразитичні властивості у нього дещо ослаблені. Хоча для розробки біопрепаратів може бути важливим отримане підтвердження вузької субстратної спеціалізації цього виду при детальних експериментальних дослідженнях матеріалу із Західних Балкан [56].

Порядок Botryosphaeriales Incertae sedis

2. *Dichomera rhamnocola* (Cooke) B. Sutton & Dyko, *Mycological Research* 93(4): 471 (1989). (Рис. 3 Є, Ж). – *Hendersonia rhamnocola* Cooke, *Nuovo Giorn. Bot. Ital.* 10(1): 21 (1878). – *Hendersonula botryosphaerioides* Bres., in Strasser, *Verh. Kaiserl.-Königl. Zool. – Bot. Ges. Wien* 55(9–10): 618 (1905). – *Camarosporium frangulae* Petr., *Annales Mycologici* 22(1/2): 32 (1924).

Міцелій занурений, світло-коричневий, з перегородками. Конідіоми еустроматичні, занурені, групами, зливаються, розпростерті чи приплюснuto-кулясті, темно-коричневі, 150–200 мкм у діаметрі, з остіоллю, товстостінні, стінка складається з кількох шарів темно-коричневих шарів *textura angularis*, з безбарвним конідієгенним шаром. Конідієгенні клітини безбарвні, циліндричні, глобластичні, перкуррентно проліферуючі, гладкі, 6–9(–24) × 2–3 мкм. Конідії від світло-коричневих до золотаво темно-коричневих, 13–20(–23) × (6,0–)6,5–8,0(–10,0) мкм, циліндричні або еліпсоїдально-видовжені, багатоклітинні, з 1–4 поперечними перегородками, трохи перетягнуті у місцях перегородок, і зрідка – однією короткою повздовжньою перегородкою, верхівка притуплена і заокруглена, основа зрізана і притуплена, товстостінні, гладкі. Муральні конідії рідкісні.

Загальне поширення. Європа. Австрія, Великобританія, Італія, Німеччина, Україна, Франція.

Поширення в Україні (Рис. 4). На старих гілочках *Viscum album* L.:

Лівобережний Лісостеп. Полтавська обл., Полтавський р-н, околиці сел. Диканька, ліс, 22.04.1959 (Бухало) [34, 35] (як *Hendersonula botryosphaerioides* Bres. в KW-M). Soc. *Nectria cinnabarina* (Tode) Fr. (як *Tubercularia cava* (Corda) Sacc. в KW-M).

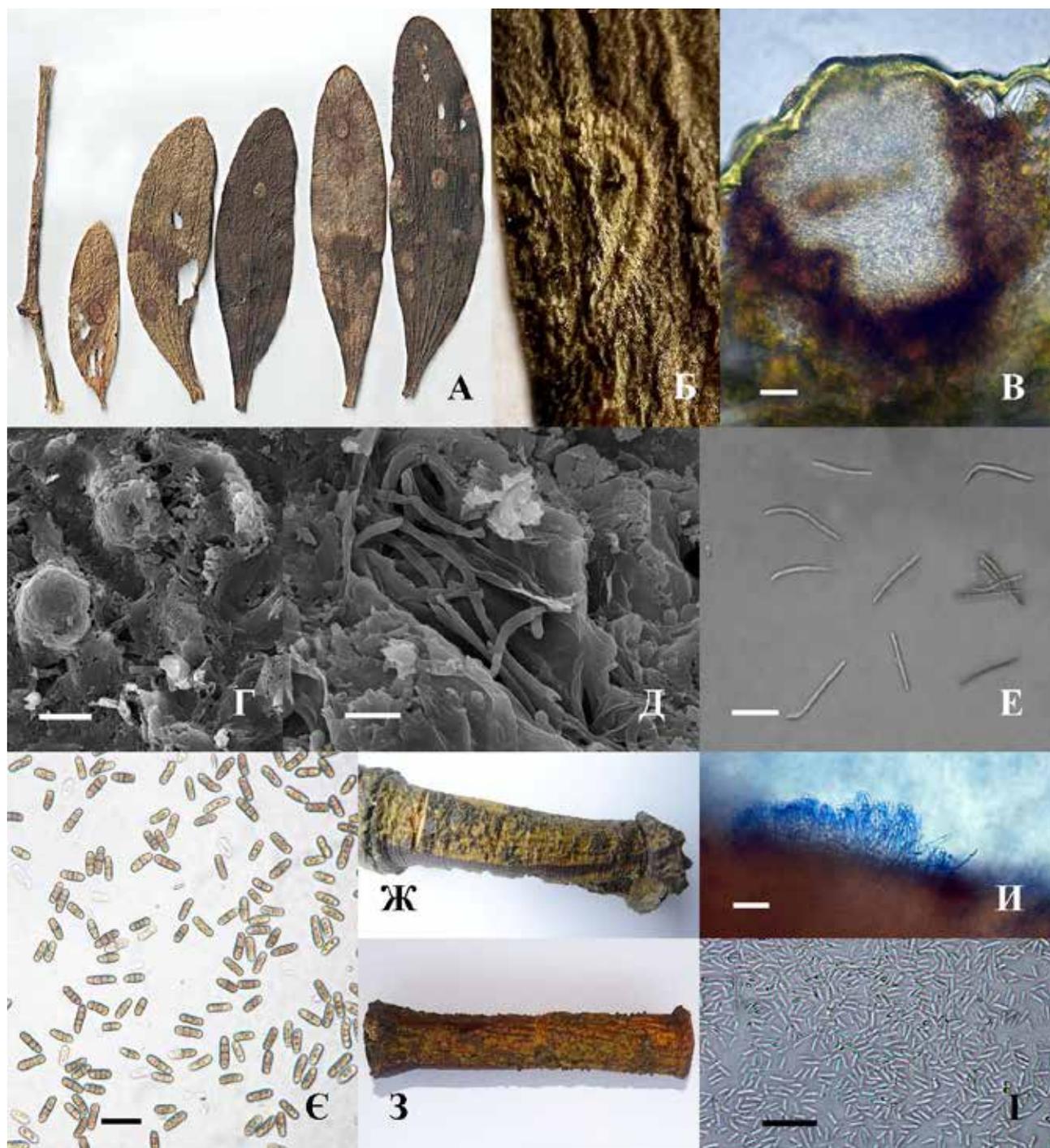


Рис. 3. Гриби, що розвиваються на *Viscum album* в Україні

Rhabdospora visci: А – гілочка і листки з характерними плямистостями при ураженні *R. visci*, Б – пікнідіальні конідіюми на відмерлій частині листка *V. album*, В – поперечний зріз конідіюми, що проривається через кутикулу листка з численними конідіями, Г – маса конідій, які виштовхуються з конідіюмом (СЕМ), Д – окремі конідії гриба на поверхні листка (СЕМ). Е – конідії гриба з пертинками. *Dichomera rhamnicola*: Є – багатоклітинні конідії гриба, Ж – стара уражена гілка *V. album* з еустроматичними конідіюмами, що прориваються. *Nectria cinnabarina*: З – гілка *V. album* зі старим анаморфним спородохальним споронішенням гриба, И – конідіеносці гриба, що утворились на стромі з малопомітною ніжкою, І – одноклітинні конідії гриба. Значення масштабної лінійки: В, Г, Е, Є, И, І – 20 мкм, Д – 10 мкм.

Назву виду, як *Dichomera rhamnicola*, подано згідно даних ревізії роду *Hendersonula* Speg. і виду *H. botryosphaerioides* Bres. [57], відповідно наводяться відомості про його поширення. На основі вивчення

голотипів *Hendersonia rhamnicola* та *Hendersonula botryosphaerioides*, ізо типу *Camarosporium frangulae*, зразків Дж. Брезадоля, Ф. Петрака, П. Страссера під назвою *Dichomera rhamni* показано, що їх морфоло-

гічні структури конспецифічні. Порівняння зразків із незрілими фрагмоконідами та зрілими муральними конідами *C. frangulae* і *H. rhamnicola* до фрагмоконідій *H. botryosphaerioides* засвідчило їх належність до одного виду; була створена нова комбінація *D. rhamnicola* [57]. Вид *H. botryosphaerioides* був описаний на *Frangula alnus* Mill., проте при визначенні матеріалу з України на *Viscum album* гриб був зазначений, як саме цей вид [34], що знайшло підтвердження у подальшому та був наданий опис у «Визначнику грибів України» [35].

Дослідження зразка *H. botryosphaerioides* KW-M зібраного А.С. Бухало у Полтавській області (опис наведено вище) показало співпадіння з характеристиками структур гриба і зображенням конідій виду *D. rhamnicola* поданими Б. Саттоном і Б. Дико [57], до синонімів якого віднесено *H. botryosphaerioides*. Муральні конідії у зразку були поодинокими. Слід зазначити, що такий плеоморфізм конідій спостерігався також у інших видів роду *Dichomera* [58]. Повторних зборів цього виду в Україні не було.

Порядок Mycosphaerellales

Родина Mycosphaerellaceae

3. *Rhabdospora visci* (Bres.) Kuntze, Revisio Generum Plantarum (Leipzig) 3(3): 514 (1898). (Рис. 3 А–Е) – *Septoria visci* Bres., *Hedwigia* 22: 180 (1883). – *Septocytia visci* (Bres.) Punith. & Spooner, *Kew Bulletin* 57(3): 545 (2002).

Плями здебільшого на нижній поверхні листків чи на тонких гілочках, округлі та трохи опуклі, блідо-коричневі, неправильного контуру, 2–4 мм у діаметрі, з чітко окресленим, підвищеним обідком коричневого кольору і конідіомами розташованими у центральній частині. **Конідіоми** пікнідіальні, строматичні, занурені та згодом проривають епідерміс листка, шаровидні, червонувато-коричневі, (120–)150–170 мкм, поодинокі або групами, з нечітко окресленим порусом, що розривається із залученням верхніх шарів стінки. Стінка конідіоми товщиною 10–12 мкм, складається з 3–4 клітинних шарів *textura angularis*, з темнішим зовнішнім шаром товстостінних клітин та безбарвними внутрішніми шарами. Конідієносці відсутні. **Конідієгенні клітини** вистилають порожнину конідіоми, безбарвні, грушо- або ампулоподібні, 6–8 × 2,5–3,0 мкм, глобластичні, часто симподіальні, з перкурентною ентеробластичною проліферацією, фіалідні. **Конідії** нитковидні, безбарвні, прямі, вигнуті чи злегка зігнуті, (22–)25–32(–38) × (1,5–)1,8–2,0(–2,4) мкм, верхівка трохи звужена та заокруглена, основа усічена, з 1–3 перегордками.

Загальне поширення. Азія. Туреччина. Європа. Австрія, Боснія та Герцоговина, Великобританія, Данія, Італія, Німеччина, Румунія, Сербія, Угорщина, Україна, Франція.

Поширення в Україні (Рис. 4). На листках і гілочках *Viscum album* L. subsp. *album*:

Західне Полісся. Волинська обл., Камінь-Каширський р-н, околиці с. Невір, НПП «Прип'ять-Стохід», берег озера Біле, березовий гай, на *Betula pendula*, 07.10.2020 (Андріанова) [39].

Прикарпатські Ліси. Львівська обл., Дрогобицький р-н, с. Нагуєвичі, Державний історико-культурний заповідник «Нагуєвичі», на *Quercus robur*, 06.03.2021 (Андріанова). – **Правобережний Лісостеп.** Черкаська обл., м. Канів, Канівський природний заповідник, 1944–1945 (Лавітська) [33].

На листках і гілочках *Viscum album* subsp. *austriacum* (Wiesb.) Vollm.:

Західне Полісся. Рівненська обл., Сарненський р-н, околиці сел. Клесів, Рівненський природний заповідник, масив Сомино, біля озера Сомино, сосновий ліс, на *Pinus sylvestris*, 13.06.2019 (Андріанова) [40].

При ревізії ексикат виданих Г. Вінтером «L. Rabenhorstii Fungi Europaei et Extraeuropaei Exsiccati» протягом 1880-х років і відповідного зразка *Septoria visci* було підтверджено приналежність гриба до *Rhabdospora visci* [59] згідно поглядів О. Кунтца [51, 60]. Попередньо цей вид також оцінювався Е. Пуніталінгамом і Б. Спунером, як приналежний до роду *Septocytia* Petr., на основі будови плодових тіл і конідій [15].

В Україні вид *R. visci* практично невідомий. У роботі З.Г. Лавітської [33], що аналізує матеріали вивчення мікобіоти широколистяних лісів басейну середньої течії річки Дніпро, згадується лише про виявлення виду *S. visci* у 1944–1945 роках, проте не зазначено ніяких морфологічних особливостей гриба, ні точної дати зборів. Зразків гриба цього періоду у подальшому не було виявлено в мікологічних колекціях. Друга і третя знахідки в Україні цього виду були зроблені на Західному Поліссі під час цих досліджень [39, 40], а четверта – у Прикарпатських Лісах, тобто всі протягом 2019–2021 років. Розвиток гриба на *V. album* був незначним, плямистості поодинокі.

Зібрані останніми роками зразки *R. visci* мали такі ж основні морфологічні характеристики (наведено вище), як подано в описі ізотипу Дж. Брезадоля гриба *S. visci* і представленого Е. Пуніталінгамом і Б. Спунером [15] – з конідіями 28–35(–40) × 2,2–2,9 мкм, а також знахідок із Туреччини – з конідіями (18,5–)24,6–36,0 × (1,50–)1,75(–2,00) мкм [27]. Простежити варіабельність розмірів конідій в українських зразках досить складно з причини малої кількості зборів, проте вони можуть бути досить довгими – до 40 мкм, а їх товщина змінна у межах ±0,9 мкм (1,5–2,4 мкм).

Слід також зазначити, що вид *R. visci*, описаний як *Septoria visci* на *Viscum album*, що паразитував на *Abies alba* Mill. [61] та вірогідно був підвидом *V. album* subsp. *abietis*, має ширший спектр рослин господарів і може уражувати й інші підвиди *V. album*. Відомо ще інший вид роду *Septoria*, а саме



Рис. 4. Місця реєстрації * – *Dichomera rhamnicola*, ○ – *Rhabdospora visci*, ⊕ – *Plenodomus visci*, ▲ – *Trichothecium roseum*, ■ – *Nectria cinnabarina*, ◆ – *Septocyta visci-britannica* на *Viscum album* в Україні

S. krystynae Ruszk. -Mich., Janik-Superson, Piskorski, Wołkowycski, що розвивається на *V. album*, який паразитував на *Betula pendula*, *Tilia cordata* та *Salix* sp. у Польщі. Вид *S. krystynae* має довші голобластичні, з перкурентною ентеробластичною проліферацією конідієгенні клітини, 10–12 × 3,0–3,5 мкм; коротші, субциліндричні чи циліндричні конідії, (13–)14–20(–21) × (1,5–)2,0(–2,5) мкм, часто звивисті [23, 62]. Зразки зібраного в Україні гриба були відмінні значно довгими, нитковидними конідіями (22–)25–32(–38) × (1,5–)1,8–2,0(–2,4) мкм, і за всіма ознаками належать до *R. visci*.

Порядок Pleosporales
Родина Leptosphaeriaceae

4. *Plenodomus visci* (Sacc.) Gruyter, Aveskamp & Verkley, *Fungal Systematics and Evolution* 6: 213 (2020). – *Phoma visci* Sacc., *Michelia* 1(2): 125 (1878). – *Phyllosticta visci* (Sacc.) Allesch., *Rabenh. Krypt. -Fl., Edn 2* (Leipzig) 1(6): 96 (1898). – *Plectophomella visci* (Sacc.) Moesz, *Magyar Botanikai Lapok* 21: 13 (1922). – *Plenodomus visci* (Moesz) Gruyter, Aveskamp & Verkley, in Gruyter, Woudenberg, Aveskamp, Verkley, Groenewald & Crous, *Studies in Mycology* 75: 22 (2012) [2013]. *Nom. inval.*, Art. 41.5 –

Apocytospora visci Höhn., *Mitt. Bot. Inst. Techn. Hochsch. Wien* 1(3): 43 (1924). –

Pleurostromella visci Petr., *Annales Mycologici* 23(1–2): 61 (1925).

На всихаючих листках, плями округлі, 2–3 мм в діаметрі, сірувато-світлокоричневі, з вузькою облямівкою 0,5 мм товщини. Конідіями пікнідіальні, строматичні, занурені, підкутикулярні, агреговані групами, шаровидні, темно-коричневі, 180–250 мкм у діаметрі, з окресленим порусом, що подекуди виступає. Стінка конідіями варіює за товщиною від 10 до 15 мкм, нерівна, складається з 4–8 шарів товстостінних клітин, склероплектенхиматична. Конідієносці безбарвні, складаються з кількох клітин. Конідієгенні клітини безбарвні, джко- або грушоподібні, 5–6 × 3,5–4,5 мкм, гладкі, голобластичні, з перкурентною ентеробластичною проліферацією. Конідії безбарвні, гладкі, паличкоподібні, до 4–6 × 1,5–2,0 мкм, одноклітинні, з заокругленою верхівкою та притуплено-зрізаною нижньою частиною.

Загальне поширення. Африка. Ефіопія. Європа. Австрія, Великобританія, Італія, Німеччина, Польща, Сербія, Угорщина, Україна, Франція, Чехія.

Поширення в Україні (Рис. 4). На листках *Viscum album* L. subsp. *album*:

Правобережний Лісостеп. Київська обл., м. Біла Церква, Державний дендрологічний парк «Олександрія», мішана посадка, на *Acer platanoides*,

18.09.2024 (Андріанова). Soc. *Botryosphaeria visci* (Kalchbr.) Arx & E. Müll.

Вид *Plenodomus visci* раніше був відомим у Європі [63] під назвами *Plectophomella visci*, *Phoma visci* та *Phyllosticta visci*. Описаний як *Phoma visci*, на *Viscum album*, гриб декілька разів змінював свою назву. У монографічному зведенні щодо целоміцетних анаморф Б. Саттона [64] отримав визнання, як тип монотипного роду *Plectophomella* Moesz. Подальші дослідження зразка Г. вон Меша з Угорщини, як голотипу роду *Plectophomella*, та молекулярно-філогенетичний аналіз культури вибраного епітипу із Франції показали приналежність цього гриба до роду *Plenodomus* Preuss [65]. Так як назва *Plectophomella visci* (Sacc.) Moesz базувалась на неопублікованій назві *Phyllosticta visci* Sacc. [66], бо П. Саккардо описав саме *Phoma visci* Sacc., то всі пізніші комбінації виявились недійсними. Згодом було уточнене номенклатурне положення виду та на основі нових зборів із Франції з гілочки *V. album* були отримані нові культури гриба і сиквенси для молекулярно-філогенетичного аналізу, який підтвердив приналежність виду до *Plenodomus visci* [67]. Ці дослідження дозволили виявити також аскоміцетну телеоморфу [67]. У поданому описі виду не надано характеристики відомої телеоморфи, так як виявлена вона була лише раз і інші дослідники її не спостерігали.

Морфологічно гриб не відрізняється від діагнозу й опису виду [64, 67] та даних, наведених щодо *P. visci* із Польщі [23]. В українському матеріалі спостерігалось незначне ураження зелених листків *V. album* грибом *P. visci*. Це перша знахідка даного виду в Україні.

Клас Sordariomycetes

Порядок Нурочеале

Родина Myrotheciomycetaceae

5. *Trichothecium roseum* (Pers.) Link, Mag. Neuesten Entdeck. Gesammten Naturk. Ges. Naturf. Freunde Berlin 3(1-2): 18 (1809).

Загальне поширення на *Viscum album* L. Європа: Сербія, Україна.

Поширення в Україні (Рис. 4). На листках *Viscum album* subsp. *austriacum* (Wiesb.) Vollm.:

Правобережний Лісостеп. м. Київ, Голосіївський р-н, НПП Голосіївський, урочище Лісники, сосновий ліс, на *Pinus sylvestris*, 25.04.2019 (Гелюта, Андріанова).

Опис виду *T. roseum* та повний список його синонімів не наводиться, так як гриб є відомим космополітом та достатньо поширений в Україні. Найчастіше *T. roseum* трапляється у ґрунтах, на опаді та відмираючих рослинах, також іноді виступає фітопатогеном, що спричиняє гнилі плодів [68]. На українських зразках листків *V. album* було знайдено поверхневий і занурений у тканини міцелій із септованими конідієносцями 100–120 × 4–5 мкм, що утворюють на верхівці у характерних ретрогресивних послідов-

ностях голобластичні, еліпсоїдальні й грушовидні конідії, 15–18 × 8–9 мкм, з 1 перегородкою, гладкі, безбарвні, рожеваті у масі. Гриб відомий у Сербії як поширений сапротроф, що розвивається на листках, стеблах і плодах *V. album* [16, 21, 26].

Порядок Нурочеале

Родина Nectriaceae

6. *Nectria cinnabarina* (Tode) Fr., *Summa Vegetabilium Scandinaviae, Sectio Posterior: 388 (1849)*. (Рис. 3 3–I).

Анаморфа. Строми прориваються крізь епідермальний шар клітин, блідо-жовті. **Конідіюми** спородохальні, поверхневі, з ніжкою, на добре розвинених стромах, гладкі, розсіяні, або циліндрично-головчасті, 2–3 мм завширшки, сіро-жовтуваті, іноді з рожевим відтінком. Ніжка строми малопомітна, прихована під епідермісом, завширшки 250–600 мкм. У верхній частині строми, що має троху загнуті краї з паралельних гіф шириною 1,5–2,5 мкм, на шарі *textura prismatica* формуються конідієносці. **Конідієносці** безбарвні, галузяться, з перегородками, 50–105 × 2,4–3,4 мкм, акроплеурогенні, прямі і троху зігнуті. **Конідієгенні клітини** термінальні та інтеркалярні, безбарвні, голобластичні, з перкурентною ентеробластичною проліферацією, 3–5 × 1,5 мкм. **Конідії** безбарвні, вузько-еліпсоїдальні чи циліндричні, прямі або злегка зігнуті, 5,5–7,0(–8,0) × (1,2–)1,5(–2,0) мкм, гладкі, без перегородок.

Загальне поширення на *Viscum album* L. Європа: Сербія, Україна, Швейцарія.

Поширення в Україні (Рис. 4). На старих гілочках *Viscum album*:

Лівобережний Лісостеп. Полтавська обл., Полтавський р-н, околиці сел. Диканька, ліс, 22.04.1959 (Бухало) (як *Tubercularia cava* (Corda) Sacc. в KW-M) Soc. *Dichomera rhamnocola* (Cooke) B. Sutton & Dyko (як *Hendersonula botryosphaerioides* Bres. в KW-M); 22.09.1959 (Бухало) (як *Tubercularia cava* (Corda) Sacc. в KW-M). – **Гірський Крим.** Республіка Крим, Білогірський р-н, с. Пчолине, Карабі-яйла, 12.05.1987 (Ісіков); Алуштинська міскрада, околиці с. Лаванда, гора Північна Демерджи, 16.07.1990 (Ісіков) [44]. – **Південний берег Криму.** Республіка Крим, м. Ялта, Нікітський ботанічний сад, 12.05.1987 (Ісіков) [44].

Повний опис виду *N. cinnabarina* та список його синонімів не наводиться, так як зразки телеоморфи гриба не були вивчені, а сам вид у результаті сучасних досліджень виявився складним комплексом декількох видів [69, 70], які широко поширені на деревних рослинах у світі та в Україні [45]. Вид *N. cinnabarina* є сапротрофом зі слабкими біотрофними властивостями, який частіше заселяє відмираючі гілки. У матеріалах зборів з Криму не зазначалось, у стадії телеоморфи чи анаморфи був знайдений гриб, були це живі рослини чи опад. Також вивчено зразок *Tubercularia granulata* var. *cava* Corda (*Tubercularia*

cava (Corda) Sacc.) на *Viscum album*, що зберігається у фунгарії (KW-M). Згідно отриманих даних морфологічні характеристики гриба відповідають анаморфі *N. cinnabarina* (*Tubercularia vulgaris* Tode) [70] і мають рясне спороношення. Подальших зборів цього виду в Україні не було. Дані щодо його розвитку на *V. album* свідчать, що цей субстрат заселяється зрідка, і можливо, *N. cinnabarina* розвивається як сапротроф [16, 21, 26].

Підвідділ Pezizomycotina
Incertae sedis

7. *Septocyta visci-britannica* Punith. & Spooner,
Kew Bulletin 57(3): 543 (2002).

Плями на поверхні листків округлі, маленькі, сірувато-коричневі, 2–3 мм у діаметрі, з тонкою облямівкою завтовшки 0,5 мм коричневого кольору. **Конідіоми** еустроматичні, поодинокі, занурені в тканини листка, від шаровидних до лінзовидних, коричневі, 150–200 мкм, розкриваються розтріскуванням. Стінка конідіоми товщиною 8–10 мкм, складається з 3–4 клітинних шарів *textura angularis*, з темнішим зовнішнім та безбарвними внутрішніми шарами. Конідієносці відсутні. **Конідієгенні клітини** безбарвні, ампуло- та пляшкоподібні, 6–10 × 2,5 мкм, голобластичні, симподіальні або перкурентною проліферуючі. **Конідії** нитковидні, безбарвні, зігнуті або прямі, 13–20 × 1,2–1,5 мкм, кінці звужені, основа усічена, верхівка загострена, без перегородок чи з однією перегородкою.

Загальне поширення. Європа: Великобританія, Україна.

Поширення в Україні (Рис. 4). На листках *Viscum album* subsp. *austriacum* (Wiesb.) Vollm., що перезимували:

Правобережний Лісостеп. Київська обл., Обухівський р-н, околиці сел. Козин, сосновий ліс, на *Pinus sylvestris*, 12.05.2022 (Андріанова). Soc. *Botryosphaeria visci*.

Вид *S. visci-britannica* був описаний відносно нещодавно з південної Англії на опалому листі *Viscum album*, що уражувала дерева *Malus domestica* [15]. Плямистість, зумовлена розвитком гриба у тканинах рослини, є малопомітною і ховається серед пошкоджень, спричинених комахами, які за деякими даними іноді можуть бути розповсюджувачами мікроскопічних грибів на *V. album* [21]. Це перша знахідка даного виду в Україні. Вид може вважатись рідкісним.

Частина вивчених зразків *V. album* з симптомами різних уражень містила міцелій чи незрілі спороношення, що свідчить на користь можливості розширити у майбутньому список асоційованих грибів даного напівпаразита.

Головні висновки. У результаті перегляду наявних мікологічних зразків, узагальнення даних попередніх публікацій, відбору матеріалу з уражених частин *Viscum album* subsp. *album* та *V. album*

subsp. *austriacum* у природних умовах і подальшої ідентифікації встановлено розвиток восьми видів фітотрофних грибів: *Botryosphaeria visci*, *Dichomera rhamnocola*, *Nectria cinnabarina*, *Plenodomus visci*, *Rhabdospora visci*, *Septocyta visci-britannica*, *Trichothecium roseum* та *Mucor circinelloides* на даних рослинах-господарях в Україні.

Сучасні дослідження засвідчують, що *B. visci*, *P. visci* і *R. visci* є неофітами у низці країн Азії, Африки та Північної Америки, де їхнє поширення відбувається паралельно з розширенням ареалу рослини-господаря. Особливу увагу привертає *B. visci*, який виявився за даними останніх досліджень космополітичним видом і за сприятливих умов демонструє масовий розвиток анаморфної стадії (безстатевої морфи); кількість повідомлень про його знахідки в Україні та світі стрімко зростає. Рідкісність грибів *P. visci*, *R. visci* та *S. visci-britannica*, два останні види виявлено вперше для території України, найімовірніше зумовлена недостатнім рівнем їх вивченості та слабо вираженою симптоматикою при ураженні *V. album*, що ускладнює їх ідентифікацію. Інші встановлені для мікобіоти України види, імовірно, належать до фонових і розвиваються переважно на ослаблених або відмираючих рослинах, які рідше виступають об'єктами дослідження. Водночас сумчасті гриби на *V. album* частіше реєструвалися у Лісостепу, де формуються найбільш сприятливі умови як для розвитку грибів, так і для рослини-господаря.

Слід також зазначити, що міжнародні дослідження останніх років демонструють інтеграцію новітніх методів метагеноміки, молекулярно-філогенетичного аналізу, ізолюваних чистих культур та фармакологічного аналізу, оскільки етап первинного накопичення даних щодо біорізноманіття грибів уже значною мірою реалізований. В Україні основна увага зосереджена на збереженні природних популяцій деревних рослин, які уражуються *V. album*, дослідженні складу грибів-гіперпаразитів, виділенні чистих культур *B. visci*, доборі методів біологічного контролю.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані дані відображають сучасний стан поширення фітопатогенних сумчастих грибів на *Viscum album* в Україні за різних кліматичних умов. Представлені детальні відомості можуть бути у нагоді для подальшого вивчення різноманітності адаптаційних можливостей деревних рослин у видових комплексах за участі живильних рослин, напівпаразита *V. album* і його грибів-гіперпаразитів. Результати складають основу подальшого моніторингу стану екосистем, розповсюдження фітопатогенів та їх впливу на масовий розвиток *V. album*, а також межі екологічної толерантності рослин до гіперпаразитів в умовах України. Матеріали досліджень можуть бути використані для розробки біологічних методів боротьби

з інвазією *V. album*, використовуючи не лише гемібіотроф *Botryosphaeria visci*, але й інші виявлені рідкісні для України фітопатогени, як *Plenodomus visci*, *Rhabdospora visci* і *Dichomera rhamnicola*, при ураженні якими спостерігалась імунологічна реакція рослин.

Автор висловлює вдячність д.б.н. В.П. Гелюти за деякі л'юбезно надані мікологічні зразки, можливість використати фотокамеру для мікроскопічних ілюстрацій та його незмінну цікавість до фітопатогенів *V. album* в Україні, що надихнули автора у підготовці різномірних матеріалів до публікації.

Література

1. POWO. Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew, 2025. URL: <https://powo.science.kew.org/> (дата звернення: 24.06.2025).
2. Таран Н.Ю., Светлова Н.Б., Бацманова Л.М., Улинець В.З., Ганчурін В.В. Біологія розвитку *Viscum album* L. та екологічний моніторинг її поширення в лісопаркових біоценозах. *Український ботанічний журнал*. 2008. Т.65, № 2. С. 242–251.
3. Krasylenko Y., Sosnovsky E., Atamas N., Popov G., Leonenko V., Janošiková K., Sytschak N., Rydlo K., Sytnyk D. The European mistletoe (*Viscum album* L.): distribution, host range, biotic interactions and management worldwide with special emphasis on Ukraine. *Botany*. 2020. Vol. 98, No. 9. P. 1–55. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjb-2020-0037>.
4. Орлов О.О., Жуковський О.В., Бородавка В.О., Бородавка О.Б., Шевчук В.В., Матейчик В.І., Арват Л.С. Омела австрійська (*Viscum album* ssp. *austriacum* (Wiesb.) Vollm.) у соснових лісах України: сучасний стан проблеми. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2023. Вип. 142. С. 124–135. DOI: <https://doi.org/10.33220/1026-3365.142.2023.124>.
5. Рибалка І.О., Вергелес Ю.І. Вплив факторів довкілля на поширення омели білої (*Viscum album* L.) в урбанізованих ландшафтах на території м. Харків. *Вісник ХНАУ*. 2012. Т. 11. С. 153–161.
6. Гнатюк О.М., Кавун Е.М. Особливості розповсюдження омели білої в паркових і рекреаційних зонах Лісостепу та Полісся. *Вісник ЖНАЕУ*. 2016. Т. 2 (56), ч. С. 183–192.
7. Матусяк М. В. Біолого-екологічні особливості поширення омели білої (*Viscum album*) в умовах міста Вінниця. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 8. С. 66–69. DOI: <https://doi.org/10.36930/40290810>.
8. Білоножко Ю.О., Калафат Л.О., Рабоконт А.М., Постовойтова А.С., Приваліхін С.М., Демкович А.С., Пірко Я.В. Особливості деревних рослин, які заселяє *Viscum album* (Santalaceae) у місті Києві. *Український ботанічний журнал*. 2022. Т. 79, № 6. С. 388–396. DOI: <https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.06.389>.
9. Zhytova O., Kotyuk L., Andreieva O. Current status of the distribution of European mistletoe (*Viscum album* L.) in Zhytomyr Polissia. *Studia Biologica*. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 111–124. DOI: <https://doi.org/10.30970/sbi.1801.75710>.
10. Schaller G., Urech K., Grazi G., Giannattasio M. Viscotoxin composition of the three European subspecies of *Viscum album*. *Planta Medica*. 1998. Vol. 64, No. 7.
11. Harmsma M., Gromme M., Ummelen M., Dignef W., Tusenius K.J. Differential effects of *Viscum album* extract IscadorR Qu on cell cycle progression and apoptosis in cancer cells. *International Journal of Oncology*. 2004. Vol. 125. P. 1521–1529.
12. Камінський Д.Б., Беднарчик-Цвингар Б., Запрутко Л., Лесик Р.Б. Концепція «double-drugs» у молекулярному дизайні протипаразитних агентів на основі природних тритерпенів та гетероциклічних «малих молекул». В: *Planta+. Досягнення та перспективи*. К.: Паливода А.В., 2020. С. 86–88.
13. Sadananda T.S., Govindappa M., Ramachandra Y.L. *In vitro* antioxidant activity of lectin from different endophytic fungi of *Viscum album* L. *British Journal of Pharmaceutical Research*. 2014. Vol. 4, No. 5. P. 626–643.
14. Ariantari N.P., Daletos G., Mándi F., Kurtán T., Müller W.E.G., Lin W., Ancheeva E., Proksch P. Expanding the chemical diversity of an endophytic fungus *Bulgaria inquinans*, an ascomycete associated with mistletoe, through an OSMAC approach. *Royal Society of Chemistry Advances*. 2019. Vol. 9. P. 25119–25132. DOI: <https://doi.org/10.1039/c9ra03678d>.
15. Punithalingam E., Spooner B.M. New taxa and new records of coelomycetes for the UK. *Kew Bulletin*. 2002. Vol. 57, No. 3. P. 533–563. DOI: <https://doi.org/10.2307/4110985>.
16. Караціх Д., Лазарев В., Миленковий М. Найзначніші паразитске и сапрофитске гљиве на белој имели (*Viscum album* L.) и могућност њиховог коришћења у биоконтроли. *Гласник Шумарског Факултета*. 2004. Бр. 89. С. 115–126. DOI: <https://doi.org/10.2298/GSF0489115K>.
17. Varga I., Taller J., Baltazár T., Hyvönen J., Poczai P. Leaf-spot disease on European mistletoe (*Viscum album*) caused by *Phaeobotryosphaeria visci*: a potential candidate for biological control. *Biotechnology Letters*. 2012. Vol. 34. P. 1059–1065. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10529-012-0867-x>.
18. Kotan R., Okutucu A., Görmez A.A., Karagoz K., Dadasoglu F., Karaman İ., Hasanekoglu I., Kordali Ş. Parasitic bacteria and fungi on common mistletoe (*Viscum album* L.) and their potential application in biocontrol. *Journal of Phytopathology*. 2013. Vol. 161, No. 3. P. 165–171. DOI: <https://doi.org/10.1111/jph.12048>.
19. Erdoğdu M., Ulukapt M., Karayel A.I., Suludere Z. Records of *Aureobasidium harposporum*, *Sarcophoma miribelii*, and *Stigmina dothideoides* from Turkey. *Mycotaxon*. 2019. Vol. 134. P. 619–625.
20. Tkaczyk M., Sikora K. First report of the occurrence of *Sphaeropsis visci* on mistletoe (*Viscum album* L.) in Poland. *Baltic Forestry*. 2020. Vol. 26, No. 1. P. 2–4. DOI: <https://doi.org/10.46490/BF461>.
21. Thomas P. A., Dering M., Giertych M. J., Iszkuło G., Tomaszewski D., Briggs J. Biological Flora of Britain and Ireland: *Viscum album*. *Journal of Ecology*. 2023. Vol. 111. P. 701–739. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14036>.
22. Bilonozhko Y., Krupodorova T., Rabokon A., Postovoirova A., Kalafat L., Pirko Y., Blume, Y. *In vitro* cultivation and biocontrol potential of *Botryosphaeria visci* against European mistletoe (*Viscum album* L.). *Acta Botanica Croatica*. 2023. Vol. 82, No. 2. P. 109–116. DOI: <https://doi.org/10.37427/botcro-2023-011>.
23. Pawłowicz T., Oszako T., Borowik P., Malewski T., Faedda R. The mycobiota diversity associated with mistletoe (*Viscum album* L.) in Poland. *Forests*. 2024. Vol. 15, No. 2152. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15122152>.

24. Géza F., László J., Ildikó V., Szilvia P. A fehér fagyöngy (*Viscum album* L.) parazita gombái. *Növényvédelem*. 2009. K. 45, S. 4. O. 178–183.
25. *CABI Digital Library*. *Viscum*. 2025. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/> (дата звернення: 01.07.2025).
26. Farr D.F., Rossman A.Y. *Fungal Databases, Systematic Mycology and Microbiology Laboratory, ARS, USDA*. 2016. URL: <http://nt.ars-grin.gov/fungaldatabases> (дата звернення: 12.07.2016).
27. Doğan G., Erdoğan M., Aytaç Z., Karayel A.I., Suludere Z., Ertuğrul T. Five new foliicolous micromycete records from Turkey. *Mycotaxon*. 2022. Vol. 136. P. 841–852.
28. Potebnia A. Beiträge zur Micromycetenflora Mittel-Russlands (Gouv. Kursk und Charkow). *Annales Mycologici*. 1910. Vol. 8, No. 1. P. 42–93.
29. Wróblewski A. Przyczynę do znajomości grzybów Pokucia. I. *Sprawozdanie Komisji Fizjograficznej Polskiej Akademii Umiejętności*. 1913. Vol. 47, No. 2. P. 147–178.
30. Wróblewski A. Drugi przyczynek do znajomości grzybów Pokucia i Karpat Pokuckich. *Sprawozdanie Komisji Fizjograficznej Polskiej Akademii Umiejętności*. 1916. Vol. 50. P. 82–154.
31. Гродзінська В.П. Матеріали до грибної флори Білоцерківщини. *Записки Білоцерківського краєзнавчого товариства*. 1928. Т. 1, № 4. С. 193–220.
32. Лавітська З.Г. Головніші паразитні гриби району Канівського біогеографічного заповідника. *Труди Канівського заповідника. 7. Наукові записки Київського державного університету*. 1949. Т. 8, № 6. С. 27–45.
33. Лавітська З.Г. Матеріали до мікологічної флори широколистяних лісів району середнього Дніпра. *Матеріали до вивчення історії та природи району Канівського заповідника*. Київ: Київський університет, 1962. С. 66–75.
34. Бухало А.С. Нові та рідкісні для флори УРСР види грибів з Лівобережного Лісостепу. *Український ботанічний журнал*. 1960. Т. 17, № 6. С. 94–99.
35. Морочковський С.Ф., Радзівський Г.Г., Зерова М.Я. та ін. *Визначник грибів України. Т. 3: Незавершені гриби*. Київ: Наукова думка, 1971. 696 с.
36. Дудка І.О., Гелюта В.П., Андріанова Т.В., Гайова В.П., Тихоненко Ю.Я., Придюк М.П., Голубцова Ю.І., Кривомаз Т.І., Джаган В.В., Леонтєв Д.В., Акулов О.Ю., Сивоконь О.В. *Гриби заповідників та національних природних парків Лівобережної України*. У 2 т. Київ: Арістей, 2009. Т. 1 – 306 с.; Т. 2 – 428 с.
37. Phillips A.J.L., Alves A., Pennycuik S.R., Johnston P.R., Ramaley A., Akulov A., Crous P.W. Resolving the phylogenetic and taxonomic status of dark-spored teleomorph genera in the Botryosphaeriaceae. *Personia*. 2008. Vol. 21, No. 1. P. 29–55. DOI: <https://doi.org/10.3767/003158508X340742>.
38. Бублик Я.Ю. Екологічні групи ранньовесняних аскомікотів (Ascomycota) НПП «Сколівські Бескиди». *Наукові записки Державного природознавчого музею*. 2017. Вип. 33. С. 153–164.
39. Андріанова Т.В. Фітопатогенні аскомікоти в осінньому аспекті біоти Національного природного парку «Прип'ять-Стохід». *Науковий вісник НПП Прип'ять-Стохід*. 2020 (2021). Т. 10, № 2. С. 1–12.
40. Андріанова Т.В. Нові відомості про фітопатогенні гриби Рівненського природного заповідника. У: *Шацьке поозер'я в контексті змін клімату: збірник матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 70-річчю від дня народження професора Петліна В. М.* (1–3 жовтня 2021 р., м. Луцьк). Луцьк: ВНУ ім. Лесі Українки, 2021. С. 163–168.
41. Гарбуз Д. Нові знахідки фітотрофних грибів із національного природного парку «Гетьманський». У: *Молодь і поступ біології: збірник тез доповідей XVI Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої 75-річчю створення біологічного факультету Львівського національного університету ім. І. Франка та 90-річчю від дня народження проф. М. П. Деркача* (м. Львів, 27–29 квітня 2020 р.). Львів, 2020. С. 52–53.
42. Новгородський А. Історичні аспекти та сучасне поширення фітопатогенного гриба *Botryosphaeria visci* (Kalchbr.) Arx & E. Müll. в Україні. У: *Дністерські читання: матеріали міжнародної конференції Дністровського регіонального ландшафтного парку* (18 жовтня 2024 р., м. Тлумач, Івано-Франківська обл., Україна). Одеса: Олді+, 2024. С. 155–157.
43. Гелюта В.П. Критичний перегляд видового складу борошністоросяних грибів (*Erysiphaceae, Ascomycota*) України: *Erysiphe* sect. *Erysiphe*. *Український ботанічний журнал*. 2023. Т. 80, № 1. С. 21–63.
44. *Cybertruffle's Robigalia*. URL: <https://www.cybertruffle.org.uk/robigalia/> (дата звернення: 26.06.2025).
45. GBIF. Global Biodiversity Information Facility. URL: <https://www.gbif.org> (дата звернення: 11.06.2025).
46. U.S. National Fungus Collections. U.S. National Fungus Collections Specimen Database. 2025. URL: <https://fungi.ars.usda.gov> (дата звернення: 17.07.2025).
47. *Mycobank Database*. URL: <https://www.mycobank.org/> (дата звернення: 10.07.2025).
48. *Index Fungorum*. URL: <https://www.indexfungorum.org/> (дата звернення: 10.07.2025).
49. Phillips A.J.L., Alves A., Abdollahzadeh J., Slippers B., Wingfield M.J., Groenewald J.Z., Crous P.W. The Botryosphaeriaceae: genera and species known from culture. *Studies in Mycology*. 2013. Vol. 76, No. 1. P. 51–167. DOI: <https://doi.org/10.3114/sim0021>.
50. Andrianova T.V. Diversity of phytopathogenic conidial fungi of protected nature territories in Ukraine: Study toward elaboration of conservation strategy. In: *Frontiers in Biodiversity Studies* / Eds. D. Thangadurai, C. A. Busso, L. G. Abarca-Arenas, S. Jayabalan. New Delhi: I.K. International Publishing House, 2012. P. 356–413. ISBN 978-93-81141-52-6.
51. Diedicke H. Pilze VII. *Kryptogamenflora der Mark Brandenburg und Angrenzender Gebiete*. 1914 [1915]. 1914 [1915]. Bd. 9. S. 1–962.
52. Grove W.B. *British stem-and leaf-fungi (Coelomycetes)*. Vol. 2. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1937. 406 p.
53. Arx J.A. von. *Plant-pathogenic Fungi. Beihefte zur Nova Hedwigia*. Bd. 87. Berlin & Stuttgart: J. Cramer, 1987. 288 p.
54. Pem D., Jeewon R., Bhat D.J., Doilom M., Boonmee S., Hongsan S., Promputtha I., Xu J.C., Hyde K.D. Mycosphere notes 275-324: A morpho-taxonomic revision and typification of obscure Dothideomycetes genera (*incertae sedis*). *Mycosphere*. 2019. Vol. 10, No. 1. P. 1115–1246. DOI: <https://doi.org/10.5943/mycosphere/10/1/22>.

55. Wijayawardene N.N., Hyde K.D., Dai D.Q., Sánchez-García M., Goto B.T., Saxena R.K., Erdoğan M., Selçuk F., Rajeshkumar K.C., Aptroot A. et al. Outline of Fungi and fungus-like taxa – 2021. *Mycosphere*. 2022. Vol. 13, No. 1. P. 53–453. DOI: <https://doi.org/10.5943/mycosphere/13/1/2>.
56. Zlatković M., Keča N., Wingfield M.J., Jami F., Slippers B. Botryosphaeriaceae associated with the die-back of ornamental trees in the Western Balkans. *Antonie van Leeuwenhoek*. 2016. Vol. 109, No. 4. P. 543–564.
57. Sutton B.C., Dyko B.J. Revision of *Hendersonula*. *Mycological Research*. 1989. Vol. 93, No. 4. P. 466–488.
58. Butin H. Morphological adaptation and spore pleomorphism in the form-complex *Dichomera-Camarosporium* and *Fusicoccum-Dothiorella*. *Sydowia*. 1993. Vol. 45, No. 2. P. 161–166.
59. Braun U., Bensch K. Annotated list of taxonomic novelties published in “*L. Rabenhorstii Fungi Europaei et Extraeuropaei Exsiccati, Klotzschii Herbarium Vivum Mycologicum Continuato, Editio Nova, Series Secunda*” Cent. 27 to 36 issued by G. Winter between 1881 and 1886. *Schlechtendalia*. 2022. Vol. 39. P. 1–53.
60. Kuntze O. *Revisio Generum Plantarum*. Bd. 3, H. 3. Leipzig : Arthur Felix, 1898. S. 1–576.
61. Winter G. *Rabenhorstii Fungi europaei et extraeuropaei*. Cent. XXX. cura Dr. G. Winter. *Hedwigia*. 1883. Vol. 22. P. 180–183.
62. Tan Y. P., Bishop-Hurley S. L., Shivas R. G., Cowan D. A., Maggs-Kölling G., Maharachchikumbura S. S., Pinruan U., Bransgrove K. L., De la Peña-Lastra S., Larsson E. et al. Fungal Planet description sheets: 1436–1477. *Persoonia*. 2022. Vol. 49. P. 261–350. DOI: <https://doi.org/10.3767/persoonia.2022.49.08>.
63. Zuber D. Biological flora of central Europe: *Viscum album* L. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*. 2004. Vol. 199, No. 3. P. 181–203. DOI: <https://doi.org/10.1078/0367-2530-00147>.
64. Sutton B. C. *The Coelomycetes. Fungi Imperfecti with Pycnidia, Acervuli and Stromata*. Kew, Surrey, England: Commonwealth Mycological Institute, 1980. 696 p.
65. Gruyter de J., Woudenberg J.H.C., Aveskamp M.M., Verkley G.J.M., Groenewald J.Z., Crous P.W. Redisposition of *Phoma*-like anamorphs in Pleosporales. *Studies in Mycology*. 2012 (2013). Vol. 75. P. 1–36. DOI: <https://doi.org/10.3114/sim0004>.
66. van der Aa H. A., Vanev S. G. *A revision of the species described in Phyllosticta*. Utrecht, The Netherlands: Centraalbureau voor Schimmelcultures, 2002. 510 p.
67. Crous P.W., Wingfield M.J., Schumacher R.K., Akulov A., Bulgakov T.S., Carnegie A.J., Jurjević Ž., Decock C., Denman S., Lombard L., D.P. Lawrence D.P., Stack A.J., Gordon T.R., Bostock R.M., Burgess T., Summerell B.A., Taylor P.W.J., Edwards J., Hou L.W., Cai L., Rossman A.Y., Wöhner T., Allen W.C., Castlebury L.A., Visagie C.M., Groenewald J.Z. New and Interesting Fungi. 3. *Fungal Systematics and Evolution*. 2020. Vol. 6. P. 157–231. DOI: <https://doi.org/10.3114/fuse.2020.06.09>.
68. Seifert K.A., Morgan-Jones G., Gams W., Kendrick B. *The genera of Hyphomycetes*. *CBS Biodiversity Series*. 9. Utrecht, the Netherlands: CBS-KNAW Fungal Biodiversity Centre, 2011. 997 p.
69. Hirooka Y., Rossman A.Y., Chaverri P. A morphological and phylogenetic revision of the *Nectria cinnabarina* species complex. *Studies in Mycology*. 2011. Vol. 68. P. 35–56. DOI: <https://doi.org/10.3114/sim.2011.68.02>.
70. Hirooka Y., Rossman A.Y., Samuels G.J., Lecha C., Chaverri P. A monograph of *Allantonectria*, *Nectria*, and *Pleonectria* (Nectriaceae, Hypocreales, Ascomycota) and their pycnidial, sporodochial, and synnematosus anamorphs. *Studies in Mycology*. 2012. Vol. 71. P. 1–210. DOI: <https://doi.org/10.3114/sim0001>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

МОРФОЛОГІЧНА МІНЛИВІСТЬ ІНТРОДУКОВАНОЇ ТА ПРИРОДНОЇ ПОПУЛЯЦІЙ *ORIGANUM VULGARE* L. У КАРПАТСЬКОМУ РЕГІОНІ

Гаріджук С.В., Різничук Н.І.

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, 76000, м. Івано-Франківськ
sharidzhuk@gmail.com, nadiia.riznychuk@cnu.edu.ua

У статті висвітлено результати порівняльного аналізу морфологічних особливостей інтродукованої популяції материнки звичайної (*Origanum vulgare* L.), вирощеної на території дендропарку «Дружба» загальнодержавного значення Карпатського національного університету імені Василя Стефаника (м. Івано-Франківськ), та дикорослої популяції цього виду, виявленої на природних місцезростаннях, а саме у селі Верхній Ясенів (Карпати). Дослідження проводилось з метою оцінки адаптаційного потенціалу материнки звичайної в ході її інтродукції та визначення ступеню морфологічної мінливості між популяціями, вирощеними в різних екологічних умовах. В ході дослідження було проаналізовано низку ключових морфологічних показників, зокрема: висоту пагонів рослин, кількість листків, розміри листових пластинок (їхню ширину та довжину), відстань між вузлами, а також кількість суцвіть. Дослідження проводились над популяціями у фазі активної вегетації та на молодих генеративних особинах. Отримані результати свідчать про наявність незначних морфологічних відмінностей між інтродукованою та дикорослою формами, що вказує на високий рівень екологічної пластичності рослин виду *Origanum vulgare* L. та про їхню здатність успішно адаптуватися до зміни умов вирощування. Встановлено, що інтродукована популяція характеризується сталістю основних морфологічних ознак, що може бути пов'язано з толерантністю виду до кліматичних і ґрунтових факторів Передкарпаття та про оптимальні умови зволоження та освітлення у межах дендропарку.

Отримані результати мають не лише теоретичне значення для розуміння адаптаційних механізмів *Origanum vulgare* L., але й практичне значення – зокрема для розробки рекомендацій щодо культивування виду в великих масштабах сільського господарства, використання у декоративному озелененні, у виробництві лікарської рослинної сировини, спецій та ефірних олій, а також у програмах збереження біорізноманіття регіону. Результати дослідження відкривають перспективний напрямок подальших досліджень для з'ясування ролі абіотичних факторів у формуванні фізіологічних показників та фармакологічної активності вторинних метаболітів материнки звичайної. **Ключові слова:** *Origanum vulgare* L., інтродукція рослин, вирощування рослин у великих масштабах, польові дослідження, порівняння, Передкарпаття, стебло, листок, листовка пластина, міжвузля, суцвіття, висота пагона, морфометрія, біоекологічна оцінка, сталий розвиток, біорізноманіття, зміни клімату, систематичний аналіз.

Morphological variability of introduced and natural populations of *Origanum vulgare* L. in the Carpathian region. Haridzhuk S., Riznychuk N.

The article presents the results of a comparative analysis of the morphological characteristics of an introduced population of *Origanum vulgare* L. cultivated in the “Druzhba” dendrological park of national importance at Vasyl Stefanyk Carpathian National University (Ivano-Frankivsk), and a wild population of this species found in its natural habitat in the village of Verkhniy Yaseniv (the Carpathians). The research aimed to assess the adaptive potential of *Origanum vulgare* L. during its introduction and to determine the degree of morphological variability between populations grown under different ecological conditions. During the study, a set of key morphological parameters was analyzed, including plant shoot height, the number of leaves, leaf blade dimensions (length and width), internode distance, and the number of inflorescences. The analysis was carried out on plants in the phase of active vegetation and on young generative individuals. The obtained results indicate minor morphological differences between the introduced and wild forms, which demonstrates a high level of ecological plasticity of *Origanum vulgare* L. and its ability to successfully adapt to altered growing conditions. It was found that the introduced population is characterized by the stability of its main morphological traits, which may be associated with the species tolerance to the climatic and soil factors of the Precarpathian region, as well as with favorable moisture and light conditions within the dendrological park.

The obtained results are of both theoretical and practical significance – they contribute to the understanding of the adaptive mechanisms of *Origanum vulgare* L. and can be applied in developing recommendations for large-scale cultivation of the species in agriculture, for its use in ornamental landscaping, in the production of medicinal plant raw materials, spices, and essential oils, as well as in biodiversity conservation programs in the region. The findings also outline a promising direction for further studies aimed at elucidating the role of abiotic factors in shaping the physiological parameters and pharmacological activity of secondary metabolites in *Origanum vulgare* L. **Key words:** *Origanum vulgare* L., plant introduction, large-scale plant cultivation, field studies, comparison, Precarpathia, stem, leaf, leaf blade, internode, inflorescence, shoot height, morphometrics, bioecological assessment, sustainable development, biodiversity, climate change, systematic analysis.

Постановки проблеми. Процес інтродукції материнки звичайної (*Origanum vulgare* L.) потребує витрату значної кількості ресурсів та часу. Для розуміння успішності процесу інтродукції

ми здійснили порівняння морфологічних показників *Origanum vulgare* L., яка була інтродукована на території Дендропарку «Дружба» з її аналогом в дикому середовищі, що був виявлений в ході

польових досліджень на території села Верхній Ясенів у Карпатах.

Актуальність дослідження. Порівняння морфологічних показників досліджуваних рослин створить можливість зрозуміти, чи зберігає інтродукована форма *Origanum vulgare* L. свої морфологічні властивості на рівні з дикорослою особоною. Дослідження інтродукції *Origanum vulgare* L. матиме велике значення для подальшого інтродукування різних видів лікарських рослин в агрономічній промисловості. Успішна інтродукція *Origanum vulgare* L. на теренах Передкарпаття є важливим кроком в галузі агрономії, адже її вирощування в великих масштабах та заготівля вихідної сировини забезпечить можливість використання *Origanum vulgare* L. у фармацевтичній та агрономічній промисловостях. *Origanum vulgare* L. також є джерелом виробництва спецій, харчових добавок та чайних сумішей.

Визначення природного потенціалу рослини в межах Івано-Франківської області є важливим етапом у плануванні її вирощуванні у великих масштабах. Це, у свою чергу, сприятиме розвитку місцевого агробізнесу, наявністю додаткових робочих місць і підвищенню економічної конкурентоспроможності регіону.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дане дослідження має безпосередній зв'язок із проблемними питаннями, які досліджуються в галузі біології, екології та агрономії роками, зокрема – вивченням адаптаційної здатності рослин при їхній інтродукції, з урахуванням можливих змін морфологічних та фенологічних ознак.

Практичне значення роботи полягає в оцінці пристосування *Origanum vulgare* L. до умов нового навколишнього середовища, отримані результати дадуть поштовх для планування подальшого розвитку інтродукції лікарських та ароматичних рослин на теренах Івано-Франківської області.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Лікарські ароматичні рослини є багатим та різноманітним джерелом сучасних фармацевтичних та косметологічних засобів. Серед них є дикорослі види та рослини вирощені в сільському господарстві, вони відомі своїм використанням у фармацевтичній, агрономічній та кулінарній промисловості. Унікальний аромат цих рослин пов'язаний з наявністю в їхньому біохімічному складі ефірних олій та летких речовин складної будови [1].

Origanum vulgare L. – це цінний лікарський вид рослин, а також вона є відомою спецією, зокрема за своїм використанням в італійській кухні. Рослина містить біологічно активні сполуки з антимікробними та антиоксидантними властивостями (поліфеноли, пігменти) та може бути цінним джерелом природних антисептичних засобів [2].

Origanum vulgare L. за своєю природою віддає перевагу сухим, проникним і добре дренованим грун-

там, також *Origanum vulgare* L. краще росте на ділянках, що мають доступ до сонячних променів. У затінку стебла витягуються та деформуються, а листя втрачає свій насичений аромат [3]. В Україні рослина поширена на березі Чорного моря, в Криму, степах та полісах Центральної та Східної України. [4]

За відомими вже даними, *Origanum vulgare* L. поширена на Кавказі, у Середній Азії, Китаї, в Південному Сибіру та США [5].

Кліматичні умови та типи ґрунтів на Передкарпатті можна вважати сприятливими для вирощування *Origanum vulgare* L. Знайдені, в ході наших попередніх польових досліджень, особини цього виду на території Карпат підтверджують можливість успішної інтродукції *Origanum vulgare* L. в Івано-Франківській області, проте жодної інформації про це на даний момент не виявлено.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значний інтерес науковців до процесу інтродукції рослин, деякі важливі аспекти процесу залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, фіксація морфологічних та фізіологічних змін в інтродукованих рослинах, в порівнянні з їх дикорослими аналогами. У багатьох регіонах, де проводились дослідження відсутня інформація про поведінку інтродукованих видів у новому середовищі, зокрема реакцію на локальні ґрунтово-кліматичні чинники. Це стосується навіть широко відомих і поширених рослин, таких як *Origanum vulgare* L., яка активно використовується в народній медицині, озелененні та фітомеліорації. Окремої уваги потребує вивчення змін життєвого циклу, морфометричних показників і життєздатності таких рослин поза межами природного ареалу зростання.

У зв'язку з цим, означене дослідження присвячено порівняльному аналізу інтродукованої популяції *Origanum vulgare* L., вирощеної в умовах Дендропарку, з її дикорослою формою. Метою є виявлення характеру адаптаційних змін та визначення перспектив подальшого використання в декоративному озелененні, медицині, харчовій промисловості та, як потенційної культури для локального вирощування в широких масштабах.

Новизна. У цьому дослідженні вперше проаналізовано адаптивні ознаки виду в умовах конкретного регіону – Передкарпаття, а також виявлені морфологічні особливості *Origanum vulgare* L. в ході її зростання на території Дендропарку та в порівнянні з аналогічними показниками дикорослого виду у природному для рослини ареалі (Карпати, село Верхній Ясенів). Отримані дані розширюють уявлення про екологічну пластичність *Origanum vulgare* L. та можуть бути використані для оцінки її інтродукційного потенціалу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до порів-

няльного аналізу морфологічних характеристик інтродукованих і дикорослих рослин виду *Origanum vulgare* L. Запропонована методика включає систематичні збори даних, їх кількісний та якісний аналіз, що забезпечує об'єктивну оцінку адаптаційних змін у нових умовах зростання. Такий підхід може бути використаний для вивчення інших лікарських і декоративних видів при інтродукції, а також, у ширшому контексті, екологічних і ботанічних досліджень.

Загальнонаукове значення роботи полягає у поглибленні розуміння механізмів адаптації рослин до зміни навколишнього середовища, що є ключовим у контексті екології. Отримані результати сприяють розвитку теоретичних основ інтродукції, збереження біорізноманіття та сталого природокористування.

Виклад основного матеріалу. Для проведення порівняння різниці морфологічних показників використовували популяцію *Origanum vulgare* L., інтродуковану на території Дендропарку «Дружба» загальнодержавного значення Карпатського національного університету імені Василя Стефаника та дикорослу популяцію *Origanum vulgare* L., що була виявлена в селі Верхній Ясенів, Верховинського району, Івано-Франківської області в ході попередніх польових досліджень.

Для порівняння обрали такі морфологічні показники, як: висоту пагона рослини, кількість листків, ширину та довжину листової пластини, відстань між вузлами та кількість суцвіть на одній особині. Порівняння здійснювали в різний період онтогенезу *Origanum vulgare* L., а саме вимірювання проводили на молодих генеративних рослинах та особинах у стадії активної вегетації.

Заміри здійснювались у відкритому просторі в польових умовах з метою найточнішого порівняння морфологічних ознак. Прилади, які використовувались для вимірювання: сантиметрова стрічка, лінійка та планшет для фіксування зібраних даних.

Першим етапом дослідження було визначення морфологічної різниці між рослинами в стадії розвитку вегетативних частин рослин або трубкування. Вибірка становила по 50 особин одного віку з однієї популяції. Результати висвітлені в таблиці 1. У ході

вимірювань вегетативної стадії розвитку заміри кількості суцвіть не проводились.

З отриманих даних можемо зазначити, що незважаючи на різні фактори впливу: температуру, вологу, склад повітря та світло, популяція *O. vulgare* L. інтродукована на території Дендропарку має незначні відмінності від природної.

Різницю в морфологічних параметрах помітно тільки в кількості листків, відстанню між вузлами та висоті пагона рослин.

Розташування листків в досліджуваних рослинах супротивне, кількість листків у вузлах – парна. У обох популяціях нижні листки довші (3 см) та ширші (2 см) від верхніх (довжина – 0,5 см та ширина 1 см), відстань між вузлами по середині стебла найдовша – 4 см у дикорослих особин та 3 см у інтродукованих, ближче до верхньої частини відстань між вузлами зменшується до 1 см (рис. 1).

На молодих генеративних рослинах вимірювання здійснювали за такими показниками: висота пагона рослини, кількість листків на рослині, ширина листової пластини, довжина листової пластини, відстань між вузлами, кількість суцвіть на рослині. Отримані дані підсумували та вивели середнє арифметичне. Результати порівняння морфологічних ознак висвітлені в таблиці 2.

Вибірка рослин дорівнювала 30 особинам вимірюваних в популяції на території дендропарку та у Верхньому Ясеневі. На рисунку 2 висвітлене візуальне порівняння отриманих результатів.

З отриманих даних, зауважимо, що молоді генеративні особини *Origanum vulgare* L., що були інтродуковані також виявили незначну морфологічну відмінність від природної популяції.

В основному, зміни в показниках були виявлені між висотою пагона: популяції *Origanum vulgare* L. у дендропарку в середньому дорівнює 37,5 см, а у популяції виявленої у Карпатах 40 см, та кількістю листків, у інтродукованих особин 92 шт., у дикорослих 110 шт. Різниця також спостерігалась і у кількості суцвіть, проте незначна. У вибірці з дикорослої популяції середнє значення кількості суцвіть дорівнювало 38, а у інтродукованої – 34.

Принадіжно зазначимо, що морфологічні показники відстані між вузлами, ширини та довжини лист-

Таблиця 1

Середнє значення морфологічної різниці між рослинами виду *Origanum vulgare* L. в стадії активної вегетації

Морфологічні параметри	Популяція <i>Origanum vulgare</i> L. у Дендропарку (см)	Популяція <i>Origanum vulgare</i> L. у с. Верхній Ясенів (см)
Висота пагона	25,5±1,2	27,5±1,2
Кількість листків	70,0±1,6	82,0±1,9
Ширина листка	1,50±0,5	1,50±0,7
Довжина листка	2,50±0,3	2,5±0,4
Відстань між вузлами	3,00±0,8	4,00±0,7



Рис. 1. Різниця між морфологічних показниками популяцій *Origanum vulgare L.* у стадії активної вегетації

Таблиця 2

Середнє значення морфологічної різниці між молодими генеративними рослинами виду *Origanum vulgare L.*

Морфологічні параметри	Популяція <i>Origanum vulgare L.</i> у Дендропарку (см)	Популяція <i>Origanum vulgare L.</i> у с. Верхній Ясенів (см)
Висота пагона	37,5±2,3	40,0±2,8
Кількість листків	92,0±1,6	110±1,9
Ширина листка	2,50±1,4	2,50±1,7
Довжина листка	3,00±1,0	3,00±0,9
Відстань між вузлами	4,00±0,4	4,00±0,6
Кількість суцвіть	34,0±2,3	38,0±1,8

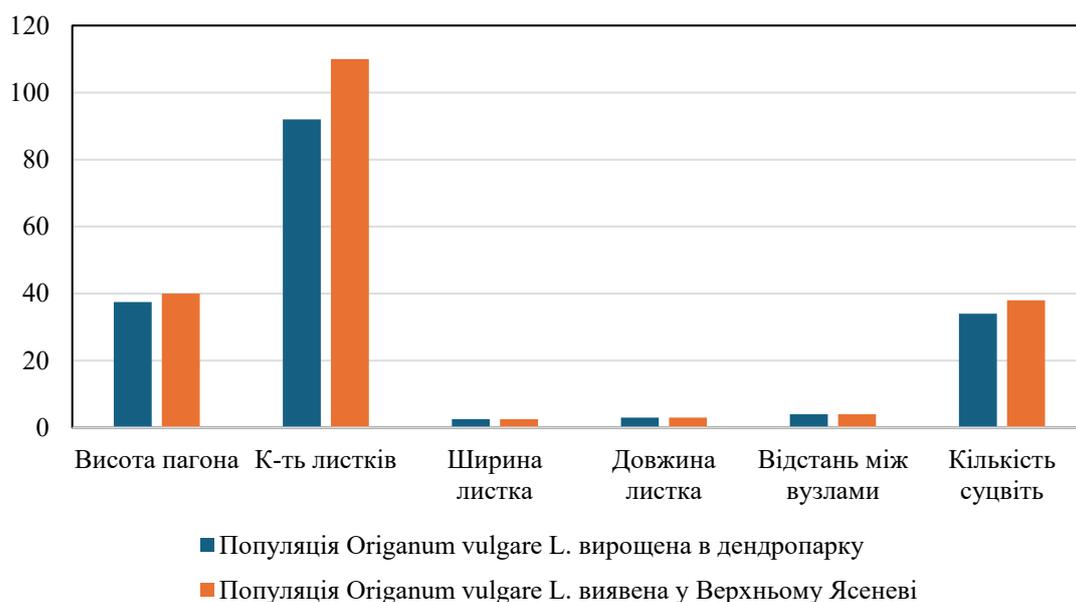


Рис. 2. Різниця між морфологічних показниками молодих генеративних особин виду *Origanum vulgare L.*

кової пластини є однаковими у досліджуваних молодих генеративних особин виду *Origanum vulgare* L.

Головні висновки. Дослідження морфологічних ознак популяцій *Origanum vulgare* L. показало незначні відмінності між інтродукованими та дикорослими особинами. Різницю виявили у висоті пагона, відстані між вузлами, кількості листків та суцвіть.

Кількість суцвіть у *Origanum vulgare* L., дослідженої в природних популяціях Карпат, виявилася в середньому на 4 одиниць більшою, ніж у особин вирощених на території Дендропарку. Щодо висоти пагона у стадії активної вегетації різниця становила в середньому 2 см, а у молодих генеративних рослин 2,5 см.

Кількість листків у інтродукованої популяції в середньому на 12 шт. менша у стадії вегетації,

в порівнянні з природньою. У молодих генеративних особин теж спостерігається, а саме на 18 шт. більше у *Origanum vulgare* L., дослідженої у Карпатах, що є незначною різницею.

Морфологічні показники інтродукованих особин загалом наближені до характеристик дикорослих популяцій. Це свідчить про успішність процесу інтродукції *Origanum vulgare* L. на Передкарпатті та відкриває перспективи подальшого розвитку досліджень і практичного використання цього виду рослин в регіоні.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати будуть використані для проведення подальших досліджень можливості інтродукції *Origanum vulgare* L. у широких масштабах та використання її в агрономічній, фармацевтичній та кулінарній промисловостях.

Література

1. Nurzyńska-Wierdak, R. *Chemical Diversity, Yield, and Quality of Aromatic Plants*. Agronomy, 2023. 13(6), 1614. doi:10.3390/agronomy13061614
2. Nurzyńska-Wierdak, R., & Walasek-Janusz, M. *Chemical Composition, Biological Activity, and Potential Uses of Oregano (Origanum vulgare L.) and Oregano Essential Oil*. Pharmaceuticals, 2025. 18(2), 267. doi:10.3390/ph18020267
3. Veenstra, J. P., & Johnson, J. J. *Oregano (Origanum vulgare) extract for food preservation and improvement in gastrointestinal health*. International Journal of Nutrition, 2019;3(4):43-52. doi:10.14302/issn.2379-7835.ijn-19-2703.
4. Korukluoglu, M., Gurbuz, O., Sahan, Y., Yigit, A., Kacar, O., & Rouseff, R. *Chemical characterization and antifungal activity of Origanum onites L. essential oils and extracts*. Journal of Food Safety, 2008. 29(1):144-161. doi: 10.1111/j.1745-4565.2008.00124.x
5. Sivicka, I., & Adamovics, A. *Research of oregano (Origanum vulgare L.) inflorescences parameters*. Agricultural sciences (crop sciences, animal sciences) 2012. 56-60.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 349.6:630*9(477)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.25>

ПРАВОВЕ РЕГУЛЮВАННЯ САМОСІЙНИХ ЛІСІВ В УКРАЇНІ: ПРОГАЛИНИ НАЦІОНАЛЬНОГО ЗАКОНОДАВСТВА ТА МІЖНАРОДНІ ЗОБОВ'ЯЗАННЯ

Лучак І.П., Миленка М.М.

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, 76018, м. Івано-Франківськ
ivan.luchak.24@pnu.edu.ua

У статті розглядається проблема правового врегулювання самосійних лісів – природних насаджень, що виникли на покинутих сільськогосподарських землях. За різними оцінками, площа таких лісів в Україні сягає від 1,5 до 2 млн гектарів, проте їхній правовий статус досі потребує уваги. У статті проаналізовано чинне законодавство і виявлено низку суперечностей, які унеможливають ефективне управління цими екосистемами. Зокрема, Закон 2022 року ввів поняття «самозаліснена ділянка», встановивши мінімальну площу 0,5 га, але не розв'язав питання зміни категорії земель та включення таких територій до лісового фонду. Представлена стаття показує, як правові прогалини перешкоджають Україні виконувати взяті на себе зобов'язання – від Паризької угоди про клімат до Конвенції про біологічне різноманіття. Самосійні ліси мають потенціал стати вагомим внеском у досягнення кліматичних цілей держави, адже вони є природними акумуляторами вуглецю, однак через відсутність їх офіційного визнання цей потенціал не враховується в національній звітності. У статті запропоновано конкретні кроки для усунення законодавчих недоліків: встановлення науково обґрунтованих критеріїв ідентифікації самосійних лісів, створення чіткої процедури їх включення до лісового фонду з урахуванням інтересів власників земель, запровадження спеціального реєстру та системи компенсацій. Представлені результати обґрунтовують потребу в особливому режимі господарювання, який передбачатиме заборону суцільних рубок до досягнення насадженнями 40 років та збереження найцінніших ділянок без втручання. Окремо розглянуто досвід європейських країн та можливості адаптації їхніх підходів до українських реалій. Запропоновано поетапну стратегію реформування законодавства з чітким розподілом відповідальності між державними органами та залученням міжнародного фінансування. *Ключові слова*: самосійні ліси, природне лісовідновлення, Лісовий кодекс України, екологічне право, міжнародні зобов'язання, стале лісокористування, покинуті сільськогосподарські землі, вуглецеві поглиначі, біорізноманіття.

Legal regulation of spontaneous forests in Ukraine: gaps in national legislation and international obligations. Luchak I., Mylenka M.

The article examines the legal regulation of spontaneous forests – natural plantations that have emerged on abandoned agricultural lands. Various estimates indicate that the area of such forests in Ukraine ranges from 1,5 to 2 million hectares, yet their legal status still requires attention. The article analyzes current legislation and identifies a number of contradictions that prevent effective management of these ecosystems. In particular, the 2022 Law introduced the concept of «self-forested plot» establishing a minimum area of 0.5 hectares, but failed to resolve the issue of changing land categories and including such territories in the forest fund. The presented article demonstrates how legal gaps hinder Ukraine's ability to fulfill its commitments – from the Paris Climate Agreement to the Convention on Biological Diversity. Spontaneous forests could make a significant contribution to achieving the state's climate goals, as they serve as natural carbon accumulators, but due to the lack of their official recognition, this potential is not accounted for in national reporting. The article proposes specific steps to eliminate legislative shortcomings: establishing scientifically grounded criteria for identifying spontaneous forests, creating clear procedures for their inclusion in the forest fund while considering landowners' interests, introducing a specialized registry and compensation system. The presented results substantiate the need for a special management regime that would prohibit clear-cutting until plantations reach 40 years of age and preserve the most valuable areas without intervention. The experience of European countries and possibilities for adapting their approaches to Ukrainian realities are examined separately. A phased strategy for legislative reform is proposed with clear distribution of responsibilities among state bodies and involvement of international financing. *Key words*: spontaneous forests, natural reforestation, Forest Code of Ukraine, environmental law, international obligations, sustainable forest management, abandoned agricultural lands, carbon sinks, biodiversity.

Постановка проблеми. Поява самосійних лісів в Україні є результатом природного поновлення деревної рослинності на землях, що втратили сільськогосподарське призначення або раніше не були залісненими [13]. Цей процес відображає соціально-економічні трансформації, які відбулися після 1991 року: скорочення агровиробництва, занепад багатьох сільських територій і поступове виведення з обробітку великої частини орних земель. За даними державної звітності [5], масштаби самозаліснення оцінюються від кількох сотень тисяч до близько

двох мільйонів гектарів, що становить суттєву частку лісового фонду країни. Такі території мають не лише природоохоронне значення: вони формують осередки біорізноманіття, сприяють зв'язності екосистем і виступають ефективними поглиначами вуглецю [12, 13]. Попри їхню екологічну та кліматичну роль, правовий статус самосійних лісів в Україні залишається неврегульованим. Недосконалість законодавчих норм і відсутність системного обліку ускладнюють інтеграцію цих територій у національні стратегії управління земельними й лісовими

ресурсами. Вирішення цієї проблеми потребує створення єдиної системи ідентифікації самосійних лісів та запровадження підходів до їхнього збереження й сталого використання.

Актуальність дослідження. Дослідження правового регулювання і механізмів управління самосійними лісами в Україні має особливу актуальність через сукупність чинників, що формуються у сучасних національних реаліях. По-перше, це зумовлено високою екологічною значущістю таких лісів – вони утворюють природні системи, які беруть участь у стабілізації ґрунтового покриву, уповільненні ерозійних процесів, підтриманні гідрологічного балансу аграрних ландшафтів, збереженні родючості ґрунтів і якості водних ресурсів [13]. По-друге, Україна стикається із зобов'язаннями міжнародного характеру – зокрема через Конвенцію про біологічне різноманіття, Паризьку угоду та європейські директиви у сфері охорони природи – що створює додаткову мотивацію для вдосконалення правового статусу природно сформованих лісових екосистем [13, 12]. Найгостріше постає саме проблема правової невизначеності: відсутність регламентованих механізмів обліку самосійних лісів, охорони та інтегрованого управління суттєво гальмує реалізацію програм з охорони природи та сталого використання земель і лісових ресурсів на державному й регіональному рівнях.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження безпосередньо корелює з виконанням стратегічних завдань державної політики України у сфері природокористування та екологічної безпеки. Зокрема, воно сприяє імплементації Угоди про асоціацію з ЄС у частині гармонізації екологічного законодавства та приведення його у відповідність до європейських стандартів охорони природи. Наукові результати дослідження мають пряме значення для реалізації Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, що передбачає комплексний підхід до управління всіма типами лісових екосистем. Актуальність роботи посилюється необхідністю досягнення Цілей сталого розвитку ООН, зокрема Цілі 15.2 щодо сталого управління лісами та відновлення деградованих екосистем. Крім того, результати дослідження безпосередньо стосуються виконання зобов'язань України за Паризькою кліматичною угодою щодо скорочення викидів парникових газів через використання потенціалу природних екосистем як вуглецевих резервуарів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання виникнення й управління самосійними лісами перебуває у центрі уваги як міжнародних, так і національних науковців, оскільки поєднує екологічні, соціально-економічні та правові аспекти.

Міжнародні порівняльні дослідження, зокрема окремі дослідження демонструють, що після 1990 р. у Карпатському регіоні відбулося масове виведення

із експлуатації сільськогосподарських земель, що спричинило природне заліснення орних земель і пасовищ. Автори підкреслюють роль соціально-економічних чинників у формуванні таких лісів: скорочення населення, зміни форм власності, занепаду аграрного виробництва [11].

У національному контексті українські дослідники розглядають як екологічні, так і юридичні аспекти цього явища. Стойко (2021) визначає самосійні ліси як результат природного лісовідновлення на сільськогосподарських землях і підкреслює їх значення для екологічної стійкості агроландшафтів. Оверковська (2022) аналізує стан правового забезпечення відтворення природних ресурсів, наголошуючи на відсутності законодавчого визначення самосійних лісів та потребі гармонізації екологічного права України з директивами ЄС [6]. До важливих нормативних актів, які формують підходи до ведення лісового господарства, належать Порядок організації охорони і захисту лісів та розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Державної стратегії управління лісами України до 2035 року» [78].

Сучасні міжнародні дослідження, зокрема Melnykovych et al. (2025), акцентують на післявоєнному відновленні лісового сектору України, інтеграції європейських практик сталого управління та підвищенні ролі природного заліснення в екосистемній політиці [12]. У правовій площині Vortnyk et al. (2025) обґрунтовують необхідність чіткого правового статусу самосійних лісів для забезпечення належної охорони й управління ними [9].

Таким чином, наявні дослідження формують міждисциплінарне підґрунтя для розуміння феномену самосійних лісів і водночас вказують на необхідність подальших робіт, спрямованих на їхню інвентаризацію, юридичну легітимацію та інтеграцію в систему національного природокористування.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Дослідження відповідає пріоритетам державної політики України у сфері охорони довкілля та сталого природокористування та сприяє виконанню Угоди про асоціацію між Україною та ЄС шляхом гармонізації національного екологічного законодавства з європейськими стандартами охорони природи. Результати роботи мають практичне значення для втілення Державної стратегії управління лісами України до 2035 року, яка передбачає інтегроване управління всіма типами лісових екосистем, включно із природно сформованими. Дослідження також узгоджується з Ціллю 15.2 Порядку денного ООН до 2030 року щодо сталого управління лісами (United Nations, 2015) та сприяє виконанню Паризької кліматичної угоди (UNFCCC, 2015) через оцінку ролі природних екосистем у скороченні викидів парникових газів [14].

Наукова новизна. На основі аналізу чинного законодавства (Лісовий кодекс України, Земельний кодекс України, Закон «Про охорону навколиш-

нього природного середовища») визначено основні прогалини правового регулювання, що стосуються віднесення самосійних лісів до певних категорій земель і лісових фондів. Розроблено науково обґрунтовану систему критеріїв і класифікаційних ознак, за якими природні насадження можуть бути визнані самосійними лісами, що створює основу для їх офіційної інвентаризації, обліку та інтеграції в єдину державну систему управління лісовими ресурсами.

Крім того, запропоновано етапну модель адаптації правового режиму таких насаджень до вимог екологічного права ЄС – від ідентифікації та кадастрового обліку до включення у стратегії сталого розвитку регіонів. Цей підхід відкриває можливості для практичного використання самосійних лісів у системі кліматичної політики України, зокрема у виконанні зобов'язань за Паризькою угодою (UNFCCC, 2015) та досягненні Цілі 15 Порядку денного сталого розвитку ООН (United Nations, 2015).

Методологічне або загальнонаукове значення.

Результати дослідження мають важливе методологічне значення для розвитку екологічного та земельного права. У межах роботи вперше поєднано положення права сталого природокористування, екологічної економіки та лісівничої науки, що забезпечило формування міждисциплінарного підходу до правового регулювання природного лісовідновлення. Запропоновані наукові положення формують основу для гармонізації національної нормативної бази з європейськими екологічними стандартами, передбаченими Угодою про асоціацію між Україною та ЄС і Стратегією ЄС із біорізноманіття до 2030 року. Розроблені рекомендації можуть бути використані при підготовці змін до Лісового кодексу України та інших підзаконних актів, що регламентують правовий статус природно сформованих лісових насаджень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх застосування органами державної влади та місцевого самоврядування під час планування заходів з обліку, охорони й відновлення самосійних лісів, а також при розробленні регіональних програм кліматичної та лісової політики.

Викладення основного матеріалу. Лісовий кодекс України визначає правові засади користування, охорони та відтворення лісів, однак не містить окремого визначення поняття «самосійний ліс» і не встановлює процедур його ідентифікації чи включення до лісового фонду. Певний прогрес відбувся із ухваленням Закону № 2321-ІХ від 20 червня 2022 р. «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо збереження лісів», яким запроваджено нове поняття «самозаліснена ділянка» – земельна ділянка будь-якої категорії (крім лісгосподарських земель і природоохоронних територій) площею понад 0,5 га, вкрита природною лісовою рослинністю [2, 3]. Ця норма створює підґрунтя для

узгодження режиму землекористування між аграрним і лісовим секторами, що відповідає підходам FAO та UNECE до раціонального використання земель усіх категорій [10, 14].

Прийняті зміни від 20 червня 2022 р. встановили порядок внесення відомостей про самозаліснені землі до Державного земельного кадастру, що створює юридичні передумови для інтеграції природно сформованих лісових екосистем у національну систему управління природними ресурсами [3].

Водночас чинна редакція Лісового кодексу продовжує визначати склад лісового фонду лише як сукупність лісових ділянок і нелісових земель, наданих для потреб лісового господарства [2]. Це породжує колізії із Земельним кодексом України, який класифікує землі за цільовим призначенням і не передбачає гнучкої процедури зміни статусу сільськогосподарських угідь, що природно заліснилися [1]. Як наслідок, значна частина самосійних лісів юридично залишається у складі земель сільськогосподарського призначення, що не відповідає їх фактичному екологічному стану [7, 13].

Подібна невизначеність простежується і в Законі України «Про оцінку впливу на довкілля», який не враховує особливості самосійних лісів як природних біотопів із високою екологічною цінністю. Відсутність спеціальних положень унеможливило належну оцінку потенційного впливу господарської діяльності на такі ділянки під час розроблення інфраструктурних чи агропромислових проєктів.

Правові прогалини стають особливо помітними у світлі міжнародних зобов'язань України. Зокрема, відповідно до Конвенції про біологічне різноманіття (1994) держава має забезпечити охорону біорізноманіття *in situ*, що охоплює й природно заліснені території як елементи національної екомережі. У контексті Паризької кліматичної угоди (UNFCCC, 2015) Україна задекларувала скорочення викидів парникових газів на 40 % до 2030 р., однак внесок самосійних лісів у депонування вуглецю наразі не враховується в офіційному національному звіті. Водночас самосійні ліси є потенційно важливим інструментом досягнення Цілі 15.2 Порядку денного ООН-2030 щодо сталого управління лісами та відновлення деградованих екосистем.

Неврегульованість статусу самосійних лісів також ускладнює виконання природоохоронних директив ЄС – Директиви 92/43/ЄЕС «Про збереження природних оселищ та дикої флори і фауни» та Директиви 2009/147/ЄС «Про збереження диких птахів». За умови їх правового визнання такі ліси могли б бути інтегровані до мережі Natura 2000, що сприяло б охороні місцевих оселищ та міграційних коридорів.

Отже, чинна нормативна база залишається фрагментарною та суперечливою: відсутні єдині критерії ідентифікації самосійних лісів, не встановлено процедури зміни категорій земель, а колізії між земель-

ним і лісовим законодавством створюють «правовий вакуум». Це ускладнює реалізацію політики сталого природокористування та гальмує інтеграцію України в європейську екологічну систему управління.

Для подолання наявних суперечностей запропоновано доповнити Лісовий кодекс України окремою статтею, яка визначатиме самосійний ліс як лісове насадження природного походження, що виникло без цілеспрямованої діяльності людини на землях поза межами лісового фонду. Необхідно також встановити науково обґрунтовані критерії для віднесення насаджень до цієї категорії: мінімальна площа – 0,1 га, висота деревостану не менше 5 м, проєктивне покриття крон – понад 10 %, вік насаджень – не менше 10 років, відсутність ознак штучного створення таких насаджень.

Подальша регламентація має передбачати процедуру включення таких ділянок до лісового фонду через триетапний процес: 1) виявлення й попередню ідентифікацію (з участю місцевих органів, власників та громадськості), 2) фахове таксаційне обстеження та екологічну оцінку, громадське обговорення, 3) прийняття рішення уповноваженим органом державної влади. Запровадження відкритого Реєстру самосійних лісів у структурі Державного земельного кадастру дозволить забезпечити їх моніторинг, статистичний облік і взаємодію з міжнародними базами даних (FAO, 2020; UNEP, 2022).

Для стимулювання власників земель до збереження природно заліснених ділянок доцільно впровадити систему екосистемних платежів і компенсацій, аналогічну до механізмів Payments for Ecosystem Services (PES), що застосовуються в країнах ЄС. Окрім відшкодування втрат від вилучення ділянки з агровиробництва, такі інструменти повинні передбачати фінансування з державного фонду охорони навколишнього середовища та міжнародних програм, зокрема LIFE+, Horizon Europe і Green Deal.

Комплексне реформування потребує створення спеціалізованого підрозділу в структурі Державного агентства лісових ресурсів України, який би координував облік, моніторинг і контроль за дотриманням режиму охорони самосійних лісів, а також розробляв методичні рекомендації й навчальні програми. Розвиток інституційної спроможності має відбуватися у тісній взаємодії з міжнародними організаціями, такими як FAO, UNECE та EU Forest Strategy Platform.

Головні висновки. Самосійні ліси – природний національний потенціал – як у контексті реалізації кліматичної політики, так і для підтримання екологічної стійкості екосистем. Вони виконують функції природних поглиначів вуглецю, регулюють гідрологічний баланс, сприяють підтриманню біорізноманіття та забезпечують адаптацію екосистем до кліматичних змін (FAO, 2020; UNECE, 2021). Попри це, їхній внесок у виконання національних та міжнародних екологічних зобов'язань залишається недостатньо реалізованим через відсутність чіткого правового статусу і сформованої системи управління. Аналіз чинного законодавства показує, що наявна нормативна база не забезпечує комплексного підходу до ідентифікації, обліку та охорони природно сформованих лісів.

Необхідним напрямом удосконалення державної політики є законодавче визначення поняття й особливостей управління самосійними лісами, створення прозорих процедур їх виявлення, інвентаризації та включення до складу лісового фонду, а також розроблення економічних механізмів стимулювання їхнього збереження. Важливим завданням є гармонізація українського законодавства з європейськими стандартами сталого лісостористування (European Commission, 2020). Усунення наявних правових прогалин сприятиме ефективнішому виконанню міжнародних зобов'язань України, передбачених Паризькою кліматичною угодою (UNFCCC, 2015), Конвенцією про біологічне різноманіття та Порядком денним ООН до 2030 року, а також забезпечить підвищення екологічної стабільності, кліматичної стійкості та ресурсної спроможності лісових екосистем держави.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення правового регулювання самосійних лісів, створення процедур їх обліку та включення до лісового фонду, а також для розробки економічних механізмів стимулювання їх збереження. Запропоновані рекомендації можуть інтегруватися у державну політику управління лісовими й земельними ресурсами, забезпечуючи виконання міжнародних зобов'язань України щодо кліматичної стабільності та цілей сталого розвитку. Крім того, результати дослідження можуть слугувати методологічною базою для наукових розробок і підвищення компетентності фахівців у сфері екологічного права та лісового господарства.

Література

1. Верховна Рада України. Земельний кодекс України: Закон України від 25.10.2001 № 2768-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14>
2. Верховна Рада України. Лісовий кодекс України: Закон України від 21.01.1994 № 3852-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12>
3. Верховна Рада України. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо збереження лісів: Закон України від 20.06.2022 № 2321-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2321-20>
4. Верховна Рада України. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>

5. Державне агентство лісових ресурсів України. Звіт про стан лісів в Україні, 2022 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://forest.gov.ua>
6. Оверковська Т. І. Правове регулювання відтворення природних ресурсів. *Право і суспільство*. 2022. № 1. С. 112-118.
7. Про схвалення Державної стратегії управління лісами України до 2035 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 грудня 2021 р. № 1777-р [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1777-2021-%D1%80>
8. Про затвердження Порядку організації охорони і захисту лісів : постанова Кабінету Міністрів України від 20 травня 2022 р. № 612 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/612-2022-%D0%BF>
9. Bortnyk N., Nesterenko A., Dubova K., Lomzhets Y., Parpan U. Administrative and Legal Framework for Forest Protection in Ukraine. *The Grassroots Journal of Natural Resources*. 2025. Vol. 8, No. 2. P. 932-950. DOI: 10.33002/nr2581.6853.080243
10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Global Forest Resources Assessment 2020*. Rome: FAO, 2020. DOI: 10.4060/ca9825en
11. Kuemmerle T., Hostert P., Radeloff V. C., Perzanowski K., Kruhlov I., et al. Cross-border Comparison of Post-socialist Farmland Abandonment and Forest Regrowth in the Carpathians. *Ecosystems*. 2008. Vol. 11, No. 4. P. 614–628. DOI: 10.1007/s10021-008-9138-x
12. Melnykovych M., Soloviy I., Kravets P., Khan Y., Yaroshchuk R., Keeton W. S., Garcia C. A. Pathways for Ukraine's Post-war Nature Recovery: Focus on Forest Socio-ecological Systems. *Ambio*. 2025. DOI: 10.1007/s13280-025-02263-0
13. Stoiko N. Research on the Phenomenon of Self-Afforestation of Agricultural Lands in Ukraine. *GIS Odyssey Journal*. 2021. Vol. 1, No. 2. P. 139-149. DOI: 10.57599/gisoj.2021.1.2.139
14. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Guidelines on Sustainable Forest Management in the ECE Region*. Geneva: United Nations, 2021. URL: <https://unece.org/forests/publications>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

UDC 631.438.2:631.95:633.2.03:637.07

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.26>

THE PROSPECTS OF USING NATURAL MEADOWS CONTAMINATED WITH ^{137}Cs AS A FEED SOURCE FOR FATTENING YOUNG LIVESTOCK

Khomutinin Yu.¹, Lazarev M.², Levchuk S.¹, Kosarchuk O.¹, Illienko V.², Lazarev D.²¹Ukrainian Institute of Agricultural Radiology
of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Mashinobudivnykiv Str., 7, 08162, Chabany²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroyiv Oborony Str., 15, 03041, Kyiv

khomutinin@gmail.com, kosarchukolga@gmail.com, laz_rev@i.ua, illienko@nubip.edu.ua

Despite the passage of nearly four decades since the incident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, a substantial area of radioactively contaminated land persists beyond the designated exclusion zone, where agricultural production is strictly prohibited. Research conducted over the past decade has demonstrated that the radiological situation on arable land enables the production of agricultural products with a level of radioactive contamination that complies with existing state safety standards. Natural land, typically utilised for the grazing of cattle in private sector enterprises, has been identified as a potential source of additional radionuclides in livestock products and, through the products, into the human body. In light of the findings from the evaluation of the present radiological condition of natural pasturelands contaminated with radionuclides in the Narodychi united territorial community of the Korosten district in the Zhytomyr region, which have been rendered unsuitable for use in accordance with the Law of Ukraine 'On the Legal Status of Territories Affected by Radioactive Contamination as a Result of the Chernobyl Disaster', the potential for the rational utilisation of pastures for the fattening of young cattle was contemplated. This contemplation was informed by the example of natural lands situated in the vicinity of the settlement of Novy Dorogin. In light of the disparate distribution of radioactive contamination within the designated area, a challenge has been identified with regard to the procurement of beef that surpasses the prevailing state standards for ^{137}Cs content. Utilising the three-stage technology for fattening young cattle with grazing on different areas of pasture land with varying levels of radioactive contamination, in conjunction with a mathematical model that accounts for changes in intake parameters and the removal of radioactive caesium from cattle of different age groups, allows for the assurance, with 90% certainty, of meat products with a level of radioactive contamination below the stipulated state hygiene standards. The proposed approach is universally applicable and facilitates the prediction of the level of radioactive contamination of animal products outside the exclusion zone. This is achieved by leveraging the patchiness of radioactive contamination of the territory, a characteristic feature of the post-Chernobyl situation. *Key words*: radioactive contamination density, ^{137}Cs , fattening for meat, young cattle, forecast of ^{137}Cs content in meat.

Перспективи використання забруднених ^{137}Cs природних луків у якості кормової бази при відгодівлі молодняку худоби. Хомутінін Ю.В., Лазарєв М.М., Левчук С.С., Косарчук О.В., Ілленко В.В., Лазарєв Д.М.

Не дивлячись на те, що після аварії на Чорнобильській атомній станції пройшло майже 40 років, за межами зони відчуження залишаються десятки тисяч гектарів радіоактивно забруднених територій, де заборонено аграрне виробництво. Дослідженнями за країні 10 років доведено, що на орних ґрунтах радіологічна ситуація дозволяє виробляти сільськогосподарську продукцію з рівнем радіоактивного забруднення відповідно до існуючих вимог державних нормативів. Природні угіддя, що використовуються, зазвичай, для випасання великої рогатої худоби приватного сектору, з точки зору радіологічного благополуччя часто є джерелом додаткового надходження радіонуклідів у продукцію тваринництва і через продукцію в організм людей. На основі результатів оцінки поточного радіологічного стану забруднених радіонуклідами природних пасовищних угідь Народицької об'єднаної територіальної громади Коростенського району Житомирської області і вилучених з використання відповідно до Закону України «Про правовий режим території, що зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» розглянуто можливість раціонального використання пасовищ для відгодівлі молодняку великої рогатої худоби м'ясного напрямку на прикладі природних угідь навколо населеного пункту Новий Дорогинь. Враховуючи не рівномірність радіоактивного забруднення території існує проблема отримання яловичини з перевищенням вимог існуючих державних нормативів на вміст ^{137}Cs . Використовуючи раніше запропоновану триетапну технологію відгодівлі молодняку великої рогатої худоби з випасанням на різних, за радіоактивним забрудненням, ділянках пасовищних угідь і використанням математичної моделі, що враховує зміни параметрів надходження і виведення радіоактивного цезію з організму великої рогатої худоби різних вікових груп, можна, з 90% вірогідністю, гарантувати отримання м'ясної продукції з рівнем радіоактивного забруднення нижче за вимоги існуючих державних гігієнічних нормативів. Запропонований підхід є універсальним і дозволяє прогнозувати рівень радіоактивного забруднення тваринницької продукції на території за межами зони відчуження, використовуючи характерну для постчорнобильської ситуації, плямистість радіоактивного забруднення території. *Ключові слова*: щільність радіоактивного забруднення, ^{137}Cs , відгодівля на м'ясо, молодняк великої рогатої худоби, прогноз вмісту ^{137}Cs в м'ясі.

Analysis of research and publications. The utilisation of land contaminated with radionuclides, which has been decommissioned in the zone of unconditional (mandatory) resettlement (ZUB(O)V), and the resolution of its re-use are becoming increasingly pertinent due to the temporary loss of substantial areas of agricultural land in eastern and southern Ukraine. A further issue within the domain of agricultural radiology pertains to the utilisation of radioactive contaminated natural meadows within the Ukrainian Polissya region. In the Recommendations of the Ukrainian Scientific Research Institute of Agricultural Radiology [1, 2], one potential solution to this problem is proposed. This solution involves the use of radionuclide-contaminated natural meadows as a feed base for livestock when fattening young cattle for meat.

Technologies for the management of beef cattle that are scientifically substantiated and which take into account the patterns of ¹³⁷Cs metabolism in the animal's body enable the utilisation of natural meadows that are contaminated with radionuclides for the fattening of young cattle for meat. The Recommendations [1, 2] propose a three-stage technology for fattening cattle for meat, which allows, at the first stage of fattening (from 6 to 12–16 months), the use of feed with any level of radioactive contamination that can be obtained in areas contaminated with radionuclides outside the immediate vicinity of the Chernobyl Nuclear Power Plant. In the second intermediate stage of fattening, the use of fodder contaminated with a level of radioactive contamination of approximately 1000 Bq/kg of grass at natural moisture content is recommended. The second stage of fattening can last 1–2 months, depending on the timing of the sale of the animals. The third stage of fattening, contingent upon the degree of radioactive contamination experienced by the animals, can extend over a period of 30–60 days. This stage involves the administration of a diet whose radioactivity for ¹³⁷Cs should not exceed 5 kBq/per ration. This approach is designed to facilitate the reduction of the ¹³⁷Cs activity concentration in the muscle tissue of the animals below the stipulated requirements of Permissible Levels 2006 (PL-06) prior to slaughter (Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 256).

In order to predict the concentration of radionuclides in cattle meat, it is necessary to consider the concentration ratio (CR), which is defined as the ratio of the ¹³⁷Cs activity concentration in meat and daily diet, expressed in the same units [3]. It is important to note that the CR depends on the age of the animals. This study utilises a modelling approach to elucidate the dynamics of ¹³⁷Cs content in the muscles of young cattle (18–20 months of age) during the process of fattening for meat. The modelling process incorporated data pertaining to the ¹³⁷Cs contamination parameters of natural meadows and pastures situated within the Norin River floodplain, in the vicinity of the village of Novy Dorogin. The period spanned from May to October, coinciding with the peak

grass growth season. The following features will be taken into account: the intake of caesium into the body of young cattle depends on the age of the animals; the daily content of ¹³⁷Cs in the animals' diet is not a constant value. This is primarily attributable to the heterogeneity of pastures ¹³⁷Cs contamination [4].

Materials and Methods. The process of radionuclide uptake into the animal body is described in detail in the following publications: B. Prister et al. (1991, 1998, 2007, 2008), Khomutinin et al. (2022), R.S. Russell (1966) and I. Gudkov et al. (2017) [1–7]. In the context of radionuclide ¹³⁷Cs uptake with a daily diet, the available studies consider two options: a single uptake and a daily (constant) uptake of ¹³⁷Cs with a daily diet.

In the work of E. Spirin (2022), a two-compartment mathematical model of the uptake and excretion of ¹³⁷Cs from the body of cattle during chronic consumption of ¹³⁷Cs-contaminated feed is proposed [8]. This model takes into account the dependence of the ¹³⁷Cs absorption coefficient on the age of the animals.

In the present case, where grazing animals are present on natural meadows contaminated with ¹³⁷Cs, the initial conditions are found to be wholly different. The mean daily uptake of ¹³⁷Cs into the bodies of the animals is not significantly constant. This phenomenon can be attributed to the variability of the ¹³⁷Cs content in the components of the daily diet, particularly in meadow grasses. The long-term variability of the ¹³⁷Cs content in these grasses following the Chernobyl accident is predominantly influenced by the heterogeneity of soil contamination with ¹³⁷Cs and local variations in soil properties [4]. Consequently, in this instance, the ingestion of ¹³⁷Cs by animals through their diet can be regarded as a daily uptake of radioactive ¹³⁷Cs, at least in principle. In this case, the overall process of ¹³⁷Cs uptake into the muscle tissue of animals $C_m(t)$ consists of two components: C_m^0 – the initial content of ¹³⁷Cs in the muscle tissue of animals (activity concentration prior to grazing) and $\Delta C_m^i(t)$ – daily uptake of ¹³⁷Cs radioactivity in animal muscle tissue due to the i -th day of grazing on radioactively contaminated pasture. It is also hypothesised that the metabolism of each daily component (portion) of ¹³⁷Cs that enters the body of animals occurs independently.

According to the works [3, 5–7], the dynamics of the specific content of ¹³⁷Cs in cattle meat with a single uptake is described by the model:

$$C_m(t) = \begin{cases} C_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}^m}} \right) & t < t_{\max} ; \\ C_{\max} \cdot \left(\alpha \cdot e^{-\frac{0.693(t-t_{\max})}{T_{1/2}^{m,1}}} + (1-\alpha) \cdot e^{-\frac{0.693(t-t_{\max})}{T_{1/2}^{m,2}}} \right) & t \geq t_{\max} \end{cases}, \quad (1)$$

where

$$C_{\max} = \left(CR \cdot A_{\text{day}} + C_0 \right) \cdot \left(\alpha \cdot e^{-\frac{0.693(t-t_{\max})}{T_{1/2}^{m,1}}} + (1-\alpha) \cdot e^{-\frac{0.693(t-t_{\max})}{T_{1/2}^{m,2}}} \right);$$

C_0 – initial concentration of ^{137}Cs in animal meat, Bq/kg; t_{max} – time when the maximum activity concentration of ^{137}Cs in animal meat is reached after a single intake (day); $T_{1/2}^h$ – the period of half-accumulation of ^{137}Cs in animal meat after a single intake (day); $T_{1/2}^{B,1}$, $T_{1/2}^{B,2}$ – first and second periods of ^{137}Cs excretion from the animal body (day); α – the fraction of ^{137}Cs released from $T_{1/2}^{B,1}$; t – time after the start of grazing of livestock on radioactive contaminated pasture (days).

In the work [3], it is recommended to use the CC (concentration coefficient), a value related to the CR (concentration ratio), to predict the specific content of radionuclides in animal organs and tissues when they are ingested once with feed. In this instance, the concentration of ^{137}Cs in an organ is expressed as a percentage of the amount that entered the gastrointestinal tract (GIT) [3, 7]. With a single uptake, C_{max} is proportional to the amount of ^{137}Cs entering the GIT (in our case the daily amount A_{day} , Bq/day): $C_{max} = CC \cdot A_{day}$. The value of CC ($C_m(t)/A_{day}$) is contingent on the age of the animals being fattened. As demonstrated in the works [2, 5, 7], the value in question is 0.35% for animals fattened for 90 days and 0.11% for animals fattened for 3600 days of the single uptake (daily uptake). The ^{137}Cs concentration in muscle tissue was measured on the first day after the animals had been exposed to the radionuclide. In this study, the change (γ) in the specified age interval is assumed to be linear in the first approximation: $\gamma = -0.0024 / (3600 - 90) \cdot (t - 90) + 0.0035$, where t – is the age of the animal, representing the number of days. As stated in this study, the age of young cattle at the commencement of the fattening process is considered to be 18–20 months. According to the aforementioned

data, estimates of γ during the fattening phase are likely to fall within the range of $\gamma = 0.00319 - 0.00308$.

The values of model parameters (1) for different organs and tissues are contingent on the age of animals and the type of radionuclides. In accordance with the aforementioned parameters, the following estimates are made for the parameters describing the accumulation of ^{137}Cs in the muscle tissue of cattle under conditions of a single uptake of ^{137}Cs : $t_{max} = 1$ day; $T_{1/2}^h = 0.2$ days; $C_0 = CC \cdot A_{day} / 0.969$. The latter will be used in this work when modelling the fattening of young cattle.

In the work [3], the following parameters are given to describe the dynamics of ^{137}Cs excretion from the muscles of adult cattle: $T_{1/2}^{B,1} = 3$ days; $T_{1/2}^{B,2} = 55$ days; $\alpha = 0.35$. In the research conducted by N. Astasheva et al. (1991), the following parameters were utilised to describe the excretion of ^{137}Cs from the meat of young cattle: bull calves (age 18–20 months) – $T_{1/2}^{B,1} = 11.2$ days, $T_{1/2}^{B,2} = 36.5$ days, $\alpha = 0.45$; heifers (age 18–20 months) – $T_{1/2}^{B,1} = 8.3$ days, $T_{1/2}^{B,2} = 38.5$ days, $\alpha = 0.61$ [9]. The dynamics of ^{137}Cs excretion from the meat of young cattle are illustrated in Figure 1.

In this study, the average value of the dynamics of ^{137}Cs excretion from the body of young cattle will be utilised in the modelling of animal fattening.

In order to obtain a model that accurately describes the dynamics of the ^{137}Cs content in animal meat, it is necessary to add expression (1) for each day of fattening and subsequently sum the result. The model in question is depicted as follows:

$$C_{\Sigma}(t) = C_0 \cdot \left(\alpha \cdot e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}^{B,1}}} + (1-\alpha) \cdot e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}^{B,2}}} \right) + \sum_{i=1}^n \Delta C_i(t), \quad (2)$$

where n – days of fattening;

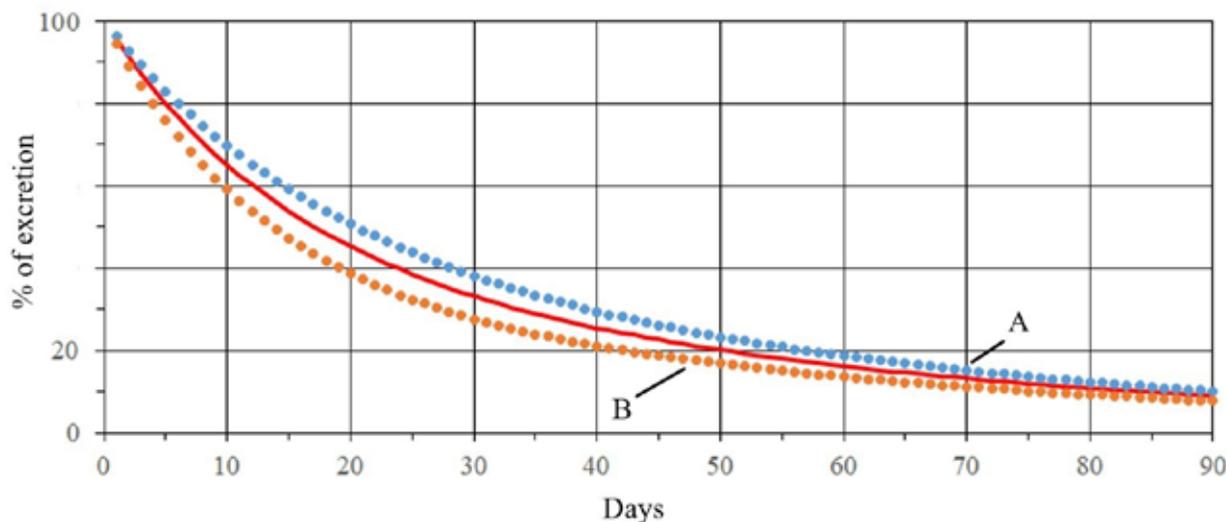


Fig. 1. The dynamics of ^{137}Cs excretion from the meat of young cattle:
 ••• – bull calves (A); ••• – heifers (B); — — average

$$\Delta C_i(t) = \begin{cases} A_{0,i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{0.693t}{T_{1/2}^i}}\right) & t < t_{upt,i} + t_{max} ; \\ \Delta C_{max,i} \cdot \left(\alpha \cdot e^{-\frac{0.693(t-t_{upt,i}+t_{max})}{T_{1/2}^i}} + (1-\alpha) \cdot e^{-\frac{0.693(t-t_{upt,i}+t_{max})}{T_{1/2}^i}} \right) & t \geq t_{upt,i} + t_{max} \end{cases} ;$$

$\Delta C_{max,i}$ – addition of ^{137}Cs content in animal meat after the i -th day of fattening;

$t_{max,i}$ – time corresponding to the maximum value of ^{137}Cs content in animal meat for the i -th fattening component (day);

$t_{upt,i}$ – time corresponding which ^{137}Cs uptake the animal's body (day).

Expressions (1) and (2) facilitate the modelling of the dynamics of ^{137}Cs content in cattle meat in instances of both single and chronic uptake by animals across a range of feeding regimens.

As demonstrated in Figure 2, the dynamics of ^{137}Cs content in the meat of young cattle (aged 3 months at fattening) are illustrated, following chronic and single uptake into the animal's body for a fattening diet, in accordance with the recommendations of B. Prister et al. (2007) (uptake with a diet of 2 kBq/day) [2]. This information was obtained using models (1) and (2). As demonstrated in Figure 2, there is a strong correlation between the dynamics of ^{137}Cs content in animal meat as determined by the proposed models and the extant literature data presented in the work [3]. This finding serves to substantiate the validity of approximating the chronic uptake of ^{137}Cs into the body of animals by a combination of daily single uptakes.

In accordance with the findings [2], the process of fattening animals for meat production can be categorised into three distinct stages: initial, intermediate, and final.

The temporal span of each stage is considered arbitrary and is determined by the operator. In this study, it is assumed that the duration of each stage is 30 days. As illustrated in Table 1, the feeding rations for young cattle with an initial age of 540 days (18 months) have been determined based on the recommendations [2] and the article [4] were utilised in the testing of model 2. It is hypothesised that the initial concentration of ^{137}Cs in animal meat is 100 Bq/kg ($C_m^0 = 100 \text{ Bq/kg}$). The content of ^{137}Cs in natural water in the vicinity of the Narodychi village was taken from the work [4] and recalculated the figures for 2025.

In the context of practical animal husbandry, characterised by either stabling or grazing, the daily uptake of radionuclides exhibits variability and is typically considered a random variable. This random variable follows a log-normal probability distribution, characterised by parameters GM and GSD [3].

As illustrated in Figure 3, the results of modelling the ^{137}Cs content in the meat of young cattle were obtained, with the feeding rations given in Table 1 being taken into account, and the statistical characteristics of the ^{137}Cs content in the diet components being considered. It is imperative to consider the daily variability of ^{137}Cs content in diet components in order to derive a set of random functions (possible realizations) that accurately describe the dynamics of ^{137}Cs content in the meat of young cattle during the fattening process. Consequently, when determining the ^{137}Cs content in cattle meat, taking into account the daily variability of ^{137}Cs in diet components, it is recommended to employ the median $Med(C_m(t))$, the upper $Max(C_m(t))$ and the lower $Min(C_m(t))$ limits

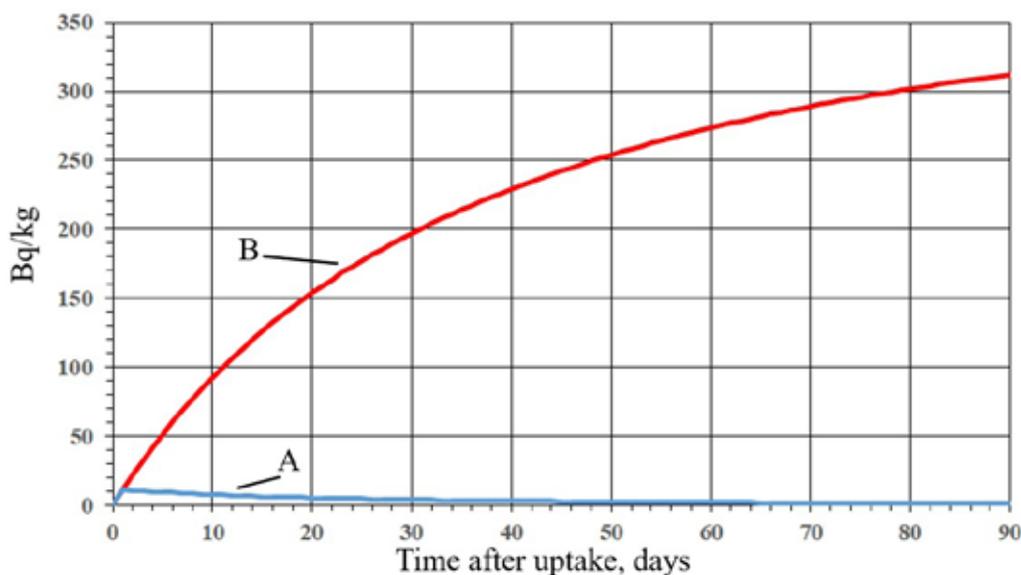


Fig. 2. The dynamics of ^{137}Cs content in animal meat are presented herewith: — the results of a single uptake of ^{137}Cs (only on the first day of fattening)(line A); — a long-term uptake of ^{137}Cs with a daily activity of 2 kBq are obtained using models (1) and (2) (line B)

Table 1

Test diets for fattening young cattle

Fattening period	Dietary component	Quantity, kg(l)	Activity concentration of ¹³⁷ Cs	
			GM, Bq/kg	GSD
Initial	Water for watering	50	0.0048	1.34
	hay	4	740	2.2
	silage	30	148	2.2
	compound feed	1.3	37	1.8
Medium	Water for watering	50	0.0048	1.34
	hay	3	185	2.2
	silage	25	148	2.2
	compound feed	1.6	37	1.8
Final	Water for watering	50	0.0048	1.34
	hay	3	185	2.2
	silage	20	148	2.2
	compound feed	1.9	37	1.8

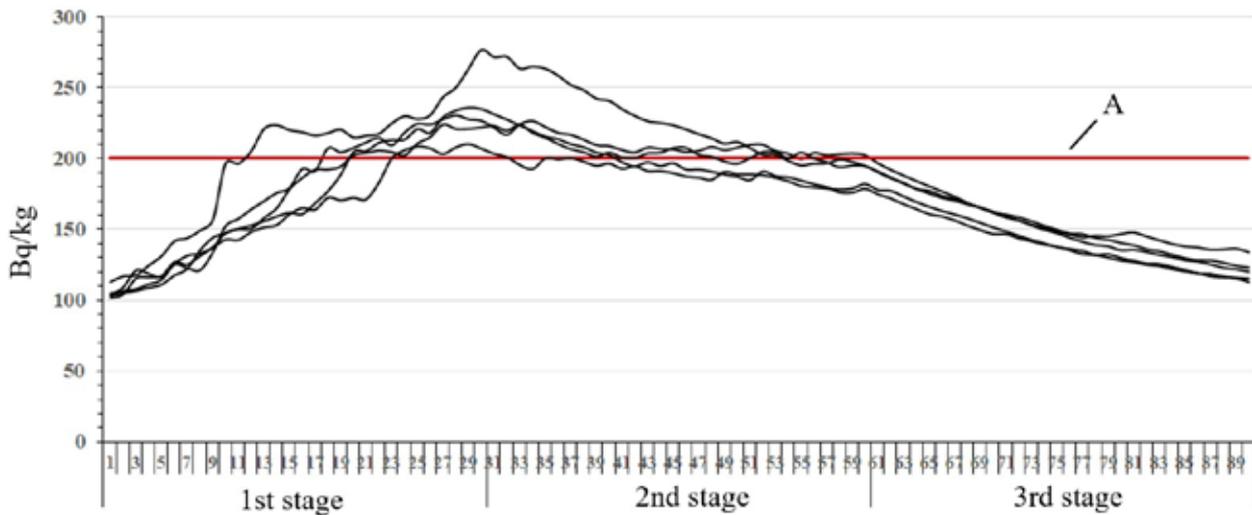


Fig. 3. Dynamics of ¹³⁷Cs content in young cattle meat: — permissible ¹³⁷Cs content in meat (A) [10]

of possible values of ¹³⁷Cs content in cattle meat at a specified confidence level.

The proposed model (2) facilitates the assessment of the ¹³⁷Cs content dynamics in the meat of young cattle at varying initial levels, with consideration for potential subsequent daily fluctuations in ¹³⁷Cs content within dietary components, and accounting for the growth of cattle. Furthermore, it facilitates the adjustment of the daily feed ration of animals with respect to both the contamination of diet components with ¹³⁷Cs and their nutrient content. Furthermore, model (2) enables the consideration of the daily variability (i.e. random nature) of the contamination of diet components with ¹³⁷Cs.

Results and Discussion. The meadows and pastures surrounding the village of Novy Dorogin are situated within the alluvial plain of the Norin River. In 2024,

a radiological survey of these lands was conducted. The results of these surveys form the basis of the ¹³⁷Cs contamination density maps. The division of meadows and pastures into discrete areas is delineated on satellite maps, with the delineation following the boundaries of forests, water bodies, forest plantations and the road network. It is hypothesised that the productivity of all areas is equivalent. As illustrated in Figure 4, the map provides a comprehensive overview of the ¹³⁷Cs contamination density in meadows and pastures surrounding the village of Novy Dorogin as of 2025, accompanied by the numbering of land plots. As illustrated in Table 2, the density of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr contamination in the soil of each land plot is shown. Furthermore, it delineates the upper limits of contamination density for a confidence level of P=0.9 (A_{0.9}, kBq/m²).

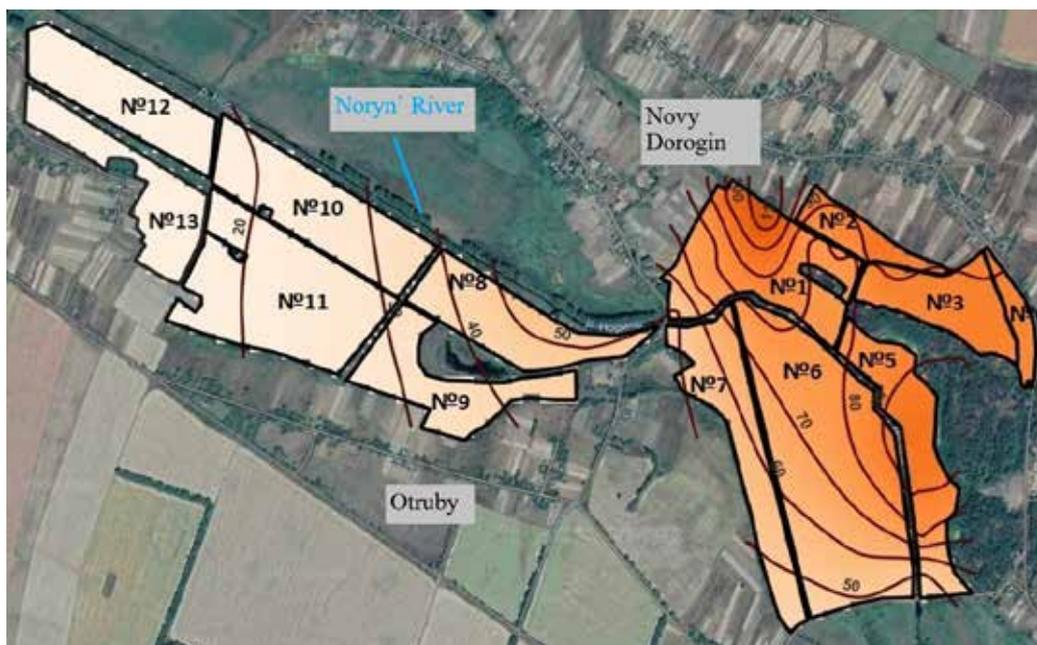


Fig. 4. Density of ¹³⁷Cs contamination of meadows and pastures near the village of Novy Dorogin as of 2025: — isolines, kBq/m²

Table 2

Assessments of radioactive contamination characteristics of meadows and pastures near the village of Novy Dorogin as of 2025

No. of the site	Area, ha	¹³⁷ Cs			⁹⁰ Sr		
		GM, kBq/m ²	GSD	A _{0,9} , kBq/m ²	GM, kBq/m ²	GSD	A _{0,9} , kBq/m ²
1(H-1)	17.5	83.1	1.47	128.4	1.14	1.90	1.74
2(H-2)	4.3	90.0	1.43	132.6	1.22	1.86	1.80
3(H-3)	9.2	88.2	1.42	129.7	1.21	1.86	1.78
4(H-4)	2.5	88.2	1.42	129.7	1.20	1.86	1.76
5(H-5)	12.3	82.3	1.50	130.5	1.13	1.92	1.74
6(H-6)	33.1	68.0	1.48	105.8	0.96	1.90	1.48
7(H-7)	12.9	55.7	1.45	83.8	0.80	1.88	1.20
8(H-8)	12.0	45.2	1.45	68.0	0.67	1.88	1.00
9(H-9)	10.7	34.5	1.47	53.3	0.52	1.90	0.80
10(H-10)	15.6	24.8	1.50	39.3	0.39	1.92	0.61
11(H-11)	22.4	22.0	1.46	33.4	0.35	1.89	0.53
12(H-12)	12.5	18.4	1.42	27.0	0.30	1.86	0.44
13(H-13)	10.2	17.8	1.42	26.2	0.29	1.86	0.43

The extent to which these meadows and pastures can be used for fattening young cattle in the summer was analysed using statistical modelling. It is hypothesised that young cattle, with an initial age of 540 days (18 months), and a meat contamination level of 200–500 Bq/kg, graze on these areas. In the context of grazing, the ingestion of soil particles by grazing animals is an inevitable consequence of their consumption of meadow grasses. The diet and the amount of daily soil uptake by oral route with meadow grasses are taken from the work [4] and demonstrated in Table 3.

The following section presents the results of a probabilistic forecast of the dynamics of possible values of ¹³⁷Cs content in the meat of young cattle when fattening using meadows and pastures with varying degrees of initial ¹³⁷Cs contamination. In accordance with the established recommendations, the initial phase encompasses the most contaminated pastures, which have been identified as those with the highest levels of ¹³⁷Cs contamination. The subsequent phase involves moderately contaminated pastures, while the third and final phase pertains to those pastures that have been found to be least contaminated

Table 3

Test diet for young cattle grazing on natural pastures around the village of Novy Dorogin

№	Dietary ingredients	Quantity	Activity concentration of ¹³⁷ Cs	
			GM, Bq/kg	GM, Bq/kg
1	Water, litres	50	0.0048	1.34
2	Meadow grasses, kg	40	Calculated based on Table 2, converted to natural moisture content with a conversion factor of 1.07.	
3	Soil (air-dry weight), kg	0.8	3.79 (calculated as in the work [4])	
4	Compound feed, kg	2	37	1.8

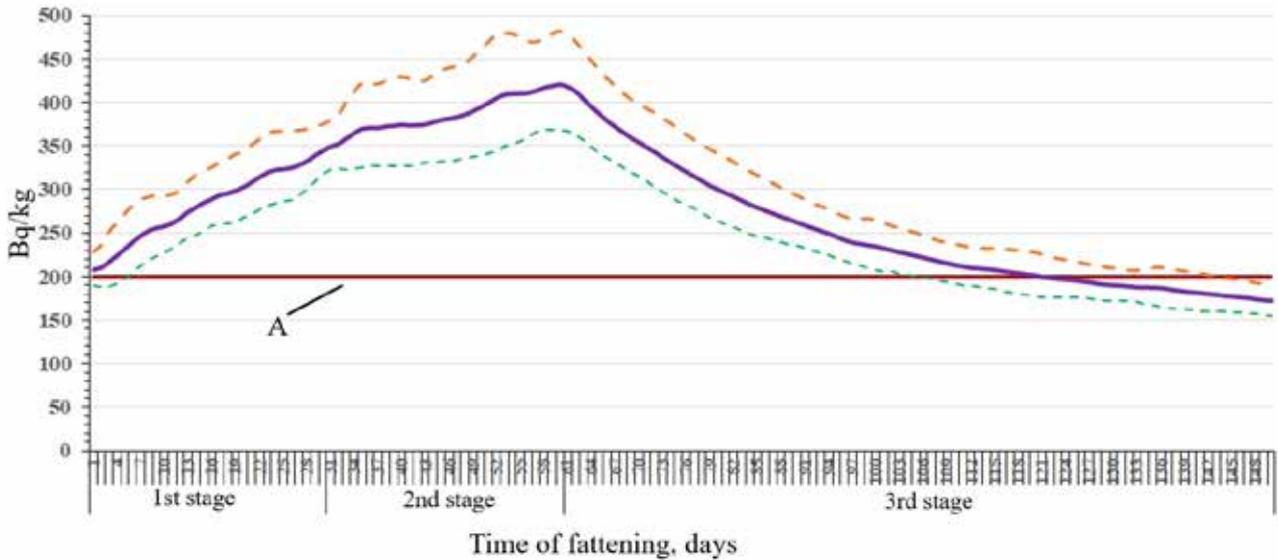


Fig. 5. Forecast of the possible values of ¹³⁷Cs content dynamics in the meat of young cattle when fattening using sites No. 2, No. 3, No. 11 and an initial content in meat of 200 Bq/kg: — permissible level of ¹³⁷Cs in meat (A) [10]; — median of possible values; - - - upper, - - - and the lower limit of possible values for confidence probability 0.9

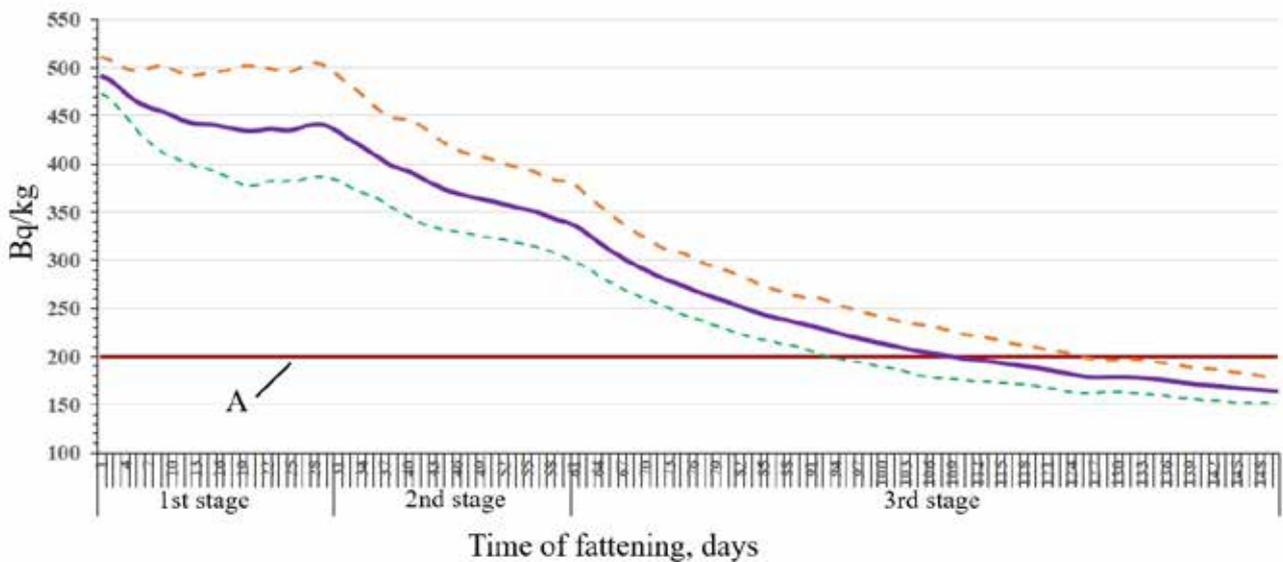


Fig. 6. Forecast of the possible values of ¹³⁷Cs content dynamics in the meat of young cattle when fattening using sites No. 2, No. 8, No. 11 and an initial content in meat of 500 Bq/kg: — permissible level of ¹³⁷Cs in meat (A) [10]; — median of possible values; - - - upper, - - - and the lower limit of possible values for confidence probability 0.9

with ^{137}Cs . As illustrated in Figure 5, the initial stage involved the most contaminated pasture, designated as site No. 2, which exhibited a high concentration of ^{137}Cs . The subsequent stage involved site No. 3, which exhibited a moderately contaminated pasture with ^{137}Cs . The third stage involved site 11, which was identified as one of the least contaminated.

As illustrated in Figure 6, the initial stage involved site No. 2, which exhibited the highest levels of ^{137}Cs contamination of the pasture. The subsequent stage involved site No. 8, which demonstrated moderate ^{137}Cs contamination levels. The third stage involved site No. 11, which exhibited one of the lowest levels of contamination.

Conclusions. A probable model has been proposed for estimating the ^{137}Cs content in the meat of young cattle when feeding them on radioactive contaminated natural meadows and pastures. This model takes into account the animals' daily uptake of ^{137}Cs into their bodies and their subsequent growth. The system facilitates daily monitoring of the ^{137}Cs content in animal meat, thereby enabling the estimation of the median, upper and lower limits of its possible values at a given confidence level.

The utilisation of this method facilitates the selection of diets and the duration of fattening of young cattle, ensuring the maintenance of the non-exceeding of maximum permissible level of ^{137}Cs in animal meat.

The proposed model has been subjected to rigorous testing in order to evaluate the ^{137}Cs content in the meat of young cattle during the fattening process, utilising radioactive contaminated natural meadows and pastures in the vicinity of the Novy Dorogin village. It has been demonstrated that all the meadows and pastures under consideration can be utilised for the fattening of young cattle, while ensuring the non-exceeding of maximum permissible level of ^{137}Cs in animal meat at the end of the fattening process. The duration of fattening on the meadows and pastures under consideration is determined by the initial level of ^{137}Cs in the meat of young cattle and the combination of grazing.

In accordance with the recommendations for fattening young cattle for meat using radioactive contaminated natural meadows and pastures around the Novy Dorogin village, a three-stage technology can be utilised: the first stage – 1 month (sites 1–5); second stage – 1 month (sites 6–9); third stage – 2–3 months (sites 10–13). This is guaranteed (with a confidence level of 0.9) to ensure a level of ^{137}Cs in the meat of young cattle lower than 200 Bq/kg.

Acknowledgements. The study was supported by the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, the Ministry of Education and Science of Ukraine (Project 110/6-pr-2024 and No. 110/7-pr-2024).

References

1. Прістер Б.С., Надточій П.П., Можар А.О. та ін. Ведення сільського господарства в умовах радіоактивного забруднення території України внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС на період 1999-2002 рр. (Методичні рекомендації). Київ: Ярмарок, 1998. 102 с.
2. Ведення сільськогосподарського виробництва на територіях, забруднених внаслідок Чорнобильської катастрофи у віддалений період (Рекомендації) / за заг. редакцією акад. УААН Прістера Б.С. К.: Атіка-Н, 2007. 196 с.
3. Прістер Б.С., Лошилов М.О., Немец О.Ф., Поярков В.О. Основи сільськогосподарської радіології. Київ: Урожай. 1991. 472 с.
4. Хомутінін Ю. В., Косарчук О. В., Поліщук С. В., Лазарев М. М., Левчук С. С., Павлюченко В. В. Оцінка можливості повернення в господарський обіг виведених, внаслідок аварії на ЧАЕС, пасовищ і сіножатей / *Ядерна фізика та енергетика*. 23(1) (2022) 47. <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.01.047>.
5. Russell R.S. Radioactivity in human diet. Pergamon Press, 1966. 552 p.
6. Прістер Б. С. Проблеми сільськогосподарської радіобіології та радіоекології при забрудненні навколишнього середовища молодю сумішшю продуктів ядерного поділу: монографія. Чорнобиль (Київ, обл.): Ін-т проблем безпеки АЕС, 2008. 320 с.
7. Гудков І.М., Гайченко В.А., Кашпаров В.О. Сільськогосподарська радіоекологія. Київ: Ліра-К, 2017. 268 с.
8. Spirin E.V. A mathematical model of ^{137}Cs uptake and removal from the body of cattle in the event of chronic consumption of contaminated fodder. *Radiats Biol Radioecol*, 2005, 45(2). P. 220-224.
9. Асташева Н.П., Романов Л.М., Костюк Д. М., Хомутінін Ю. В. Динаміка накопичення і виведення радіонуклідів із організму сільськогосподарських тварин. Проблеми сільськогосподарської радіології. Збірник наукових праць. / за ред. М.О. Лошилова. 1991. С. 160-171.
10. Про затвердження Державних гігієнічних нормативів «Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді»: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 03.05.2006, № 256 : станом на 08.04.2025. Офіційний вісник України, № 29. 2006. 02 серп. С. 142. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0845-06#Text> (дата звернення: 10.09.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

БІОРЕМЕДІАЦІЙНЕ ВІДНОВЛЕННЯ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ГРУНТІВ: ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Бондар Т.О.¹, Шестопалов О.В.², Босюк А.С.², Сакун А.О.², Нечипоренко Д.І.², Бондар Т.В.³

¹Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради»
вул. Велозаводська, 35, 61176, м. Харків

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

³Харківський національний медичний університет
пр. Науки, 4, 61022, м. Харків

arahisovasova@gmail.com, Oleksii.Shestopalov@khpi.edu.ua, Alona.Bosiuk@mit.khpi.edu.ua,
Antonina.Sakun@khpi.edu.ua, Dmytro.Nechyporenko@khpi.edu.ua, tetanabondar@gmail.com

Дослідження присвячене розробці та впровадженню біоремедіаційних технологій для відновлення нафтозабруднених ґрунтів України, які зазнали значного екологічного тиску внаслідок воєнних дій. Проблема нафтозабруднення ґрунтів, спричинена руйнуванням нафтової інфраструктури, призводить до деградації родючості, зниження біорізноманіття та порушення водно-повітряного режиму. У роботі використано комбінований підхід, що включає фіторемедіацію з використанням рослин-сидератів (сорго, просо) та мікробну біоремедіацію з застосуванням бактерій роду *Pseudomonas* (препарат «Біонорма»). Додатково досліджено вплив компосту та органічних добрив на прискорення самоочищення ґрунтів, що сприяє підвищенню активності мікроорганізмів і відновленню родючості. Експерименти проводилися в лабораторних умовах із 42 зразками ґрунту, що імітували сильне нафтозабруднення (46000 мг/кг). Результати показали, що сорго в комбінації з бактеріями *Pseudomonas* забезпечує найвищу ефективність у зниженні рівня забруднення, сприяючи формуванню органо-мінеральних агрегатів і нейтралізації фітотоксичності. Застосування методу «комп'ютерного зору» на базі нейромереж DeepLabv3 та YOLOv8 із використанням Raspberry Pi5 дозволило з точністю >95% оцінити динаміку росту рослин (зелену масу, висоту, кількість стебел). Агрохімічні аналізи підтвердили зміну рН ґрунту до нейтрального, зниження вмісту важких металів і часткове самоочищення ґрунту. Дослідження має наукову новизну завдяки комплексному підходу, адаптованому до специфічних ґрунтово-кліматичних умов регіону, та практичну цінність для рекультивації забруднених територій у поствоєнний період. Результати можуть бути використані для розробки рекомендацій з відновлення аграрних угідь, автоматизації моніторингу та включення до стратегій сталого розвитку. *Ключові слова:* біоремедіація, нафтозабруднення, фіторемедіація, екологічне відновлення, родючість ґрунту, агроекологія, сталий розвиток, компост, органічні добрива, самоочищення ґрунту.

Bioremediation of oil-contaminated soils: experimental study. Bondar T., Shestopalov O., Bosiuk A., Sakun A., Nechyporenko D., Bondar T.

The study focuses on the development and implementation of bioremediation technologies for the restoration of oil-contaminated soils in Ukraine, which have been significantly impacted by environmental stress due to military activities. Oil pollution, caused by the destruction of oil infrastructure, leads to soil fertility degradation, biodiversity loss, and disruption of water-air regimes. The research employs a combined approach, integrating phytoremediation using cover crops (sorghum, millet) and microbial bioremediation with *Pseudomonas* bacteria («Bionorma» preparation). Additionally, the use of compost and organic fertilizers was investigated to enhance soil self-purification, boosting microbial activity and fertility restoration. Experiments were conducted under laboratory conditions with 42 soil samples simulating severe oil contamination (46,000 mg/kg). The results demonstrated that sorghum, combined with *Pseudomonas* bacteria, exhibits the highest efficiency in reducing contamination levels, promoting the formation of organo-mineral aggregates, and neutralizing phytotoxicity. The application of the «computer vision» method based on DeepLabv3 and YOLOv8 neural networks, using Raspberry Pi5, enabled the dynamic assessment of plant growth parameters (green mass, height, stem count) with over 95% accuracy. Agrochemical analyses confirmed a shift in soil pH to neutral, a reduction in heavy metal content, and partial self-purification of chernozems. The study is scientifically novel due to its comprehensive approach tailored to the region's specific soil-climatic conditions and holds practical value for the reclamation of contaminated areas in the post-war period. The findings can be used to develop recommendations for restoring agricultural lands, automating monitoring processes, and integrating into sustainable development strategies. *Key words:* bioremediation, oil contamination, phytoremediation, ecological restoration, soil fertility, agroecology, sustainable development, compost, organic fertilizers, self-cleaning of the soil.

Постановка проблеми. Україна, відома своїми [1]. Це зумовлено антропогенними факторами, високородючими ґрунтами, зокрема чорноземами, зокрема руйнуванням нафтової інфраструктури (нафтобаз, нафтопроводів, транспортних вузлів), які складають значну частину сільськогосподарських угідь країни, зазнає значного екологічного тиску через забруднення ґрунтів нафтопродуктами та повномасштабним вторгненням з 2022 року. За

даними математичного моделювання, пошкоджено близько 1,91 млн га аграрних земель у регіонах, таких як Харківська, Донецька, Луганська, Сумська та Запорізька області (Лівобережна Україна) [1, 2]. Нафтопродукти, потрапляючи в ґрунт, змінюють його фізико-хімічні властивості, знижують аерацію, пригнічують мікрофлору, спричиняють фітотоксичність і призводять до тривалої деградації родючості. Відповідно до Наказу Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки «Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства» (від 20.10.1997 р., № 171) [3], концентрація нафтопродуктів понад 5 мг/кг класифікується як «середній» або «сильний» рівень забруднення, що вимагає негайних заходів рекультивативної. Проблема полягає у відсутності достатньої кількості економічно доступних, екологічно безпечних і ефективних методів очищення ґрунтів, адаптованих до умов Лівобережної України, де чорноземи мають унікальні гумусові характеристики. Біоремедіація, що включає фіторемедіацію та мікробне біодоповнення, розглядається як перспективний підхід, але потребує детального вивчення ефективності конкретних рослин (сорго, просо) та бактерій (*Pseudomonas*) у лабораторних і польових умовах, а також інтеграції сучасних цифрових технологій для моніторингу процесів відновлення, таких як «комп'ютерний зір» [4]. Також, дослідження [7] показують, що внесення компосту та органічних добрив може значно прискорити самоочищення ґрунтів за рахунок стимуляції мікробної активності, що є важливим для відновлення родючості.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю збереження родючості ґрунтів України, які є ключовим ресурсом для сільського господарства та економіки країни, забезпечуючи її провідні позиції на світовому ринку зернових, соняшнику та кукурудзи. Нафтозабруднення, спричинене воєнними діями, становить серйозну загрозу для продовольчої безпеки, екологічної стабільності та сталого розвитку [5, 6]. За оцінками, пошкодження ґрунтів призводять до втрати біорізноманіття, порушення водно-повітряного режиму та тривалого токсичного впливу на екосистеми [7]. Традиційні методи очищення (фізико-хімічні, термічні) є дорогими, енергоємними та можуть завдавати додаткової шкоди довкіллю. Біоремедіація, як екологічно безпечна та економічно доцільна технологія, має значний потенціал, але її ефективність для специфічних умов, зокрема для чорноземів із високим вмістом гумусу Лівобережної України, недостатньо досліджена. Використання рослин-сидератів (сорго, просо) та бактерій роду *Pseudomonas*, а також інноваційних методів моніторингу, таких як «комп'ютерний зір», відкриває нові можливості для точної оцінки динаміки відновлення ґрунтів. Застосування

компосту, як показано в дослідженні [17], сприяє збагаченню ґрунту органічними речовинами, що стимулює мікробну активність і прискорює розкладання нафтопродуктів. Дослідження є актуальним та спрямоване на розробку практичних рішень для рекультивативної забруднених територій, що має значення для відновлення аграрного сектору та екологічної рівноваги.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок сприяє розвитку біоремедіаційних технологій для очищення нафтозабруднених ґрунтів шляхом інтеграції фіторемедіації, мікробної біоремедіації (*Pseudomonas*) та «комп'ютерного зору» (DeepLabv3/YOLOv8) для точного моніторингу рослин [8-10]. Наукова новизна полягає в комплексному дослідженні, що підтверджує потенціал сорго для зниження забруднення та формування органо-мінеральних агрегатів. Дослідження також включає оцінку впливу компосту та органічних добрив [7], сприяють прискоренню самоочищення ґрунтів шляхом підвищення біологічної активності. Практично результати сприяють рекультивативної ґрунтів у поствоєнний період, покращенню їх структури та зниженню фітотоксичності [6, 8, 9]. Дослідження має значення для агроєкології, екологічного менеджменту та сталого розвитку. Його освітній потенціал підтримує популяризацію екологічних технологій та стратегії управління ґрунтовими ресурсами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології біологічної ремедіації розглядаються сучасними дослідниками як екологічно безпечний і науково обґрунтований підхід до очищення забруднених ґрунтів, що базується на здатності мікроорганізмів, грибів і рослин трансформувати або мінералізувати токсичні сполуки до нетоксичних продуктів, забезпечуючи природне відновлення екосистеми без вторинного забруднення [11]. Подальші дослідження свідчать, що ефективність біоремедіаційних процесів значною мірою залежить від збалансованого поєднання біотичних та абіотичних чинників, зокрема складу мікробних консорціумів, виду фіторемедіантів, рівня аерації, вологості та наявності поживних елементів. Встановлено, що синергетичне поєднання фіторемедіації з біоаугментацією за участю адаптованих штамів мікроорганізмів суттєво прискорює розклад нафтових вуглеводнів, сприяє відновленню мікробного балансу ґрунту та стабілізації екосистеми [12]. Важливу роль у цих процесах відіграє ризосферна зона, де рослини через кореневі виділення стимулюють активність мікроорганізмів, які продукують ферменти, здатні до біохімічного окиснення нафтових вуглеводнів. Комбіноване застосування фіторемедіації та інокуляції специфічними бактеріальними штамми дозволяє скоротити період детоксикації ґрунтів і підвищити рівень їх біологічного відновлення [13], що робить цей підхід перспективним для очищення нафтозабруднених

територій, особливо в умовах високого антропогенного навантаження та воєнних екологічних викликів.

Згідно з дослідженням [14], біотехнологічні методи, зокрема фіторемедіація, можуть стати ключовим інструментом для відновлення ґрунтів, забруднених унаслідок бойових дій, вибухів та витоків паливно-мастильних матеріалів. Автор підкреслює ефективність використання аборигенних рослин, адаптованих до місцевих умов, які здатні не лише зменшувати концентрацію вуглеводневих сполук, але й сприяти відновленню структури ґрунту та його біологічної активності.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на наявність численних досліджень, присвячених рекультиватії нафтозабруднених ґрунтів, залишається недостатньо вивченою ефективність біоремедіаційних технологій у специфічних ґрунтово-кліматичних умовах, зокрема Лівобережної України. Попередні роботи розглядали окремі аспекти застосування фіторемедіації чи мікробних консорціумів, однак відсутні комплексні підходи, що поєднують їх дію. Недостатньо досліджено поведінку рослин-сидератів і бактерій роду *Pseudomonas* за високих рівнів нафтозабруднення та зміни агрохімічних властивостей чорноземів у процесі ремедіації. Також потребує розвитку оцінка впливу органічних добрив і компосту на біоремедіаційні процеси, що, за даними [17], може значно прискорити розкладання забруднювачів завдяки збагаченню поживними речовинами. Також потребує розвитку цифровий моніторинг стану біоремедіаційних систем із використанням методів «комп'ютерного зору» для об'єктивної оцінки параметрів росту рослин. Саме ці аспекти зумовлюють необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення підходів до екологічно безпечного відновлення нафтозабруднених ґрунтів регіону в умовах воєнних екологічних викликів.

Новизна. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до біоремедіації нафтозабруднених ґрунтів України з поєднанням фіторемедіації (сорго, просо) та бактерій *Pseudomonas* (препарат «Біонорма»), враховуючи регіональні ґрунтово-кліматичні умови. Уперше застосовано «комп'ютерний зір» (DeepLabv3, YOLOv8, Raspberry Pi5) для високоточного моніторингу рослин. Новизною є також оцінка впливу компосту та органічних добрив на прискорення самоочищення ґрунтів, що сприяє підвищенню мікробної активності та родючості. Кількісно оцінено самоочищення чорноземів та формування органо-мінеральних агрегатів, розширюючи знання про взаємодію рослин, мікроорганізмів і ґрунту в умовах воєнних викликів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження вперше пропонує комплексний підхід до оцінки біоремедіації нафтозабруднених чорноземів Лівобережної України, поєднуючи лабораторні

методи з цифровими технологіями, інтегруючи фіторемедіацію (сорго, просо) та мікробну біоремедіацію (бактерії *Pseudomonas*), визначаючи їх спільну ефективність у відновленні ґрунтів. Включення компосту та органічних добрив, як показано в роботі [17], сприяє прискоренню самоочищення шляхом стимуляції мікробної активності. Метод «комп'ютерного зору» на базі нейромереж DeepLabv3 і YOLOv8 забезпечує точний моніторинг росту рослин (рис. 1), сприяючи автоматизації екологічного спостереження. Міждисциплінарна методологія, що об'єднує екологію, агрономію, мікробіологію та ІТ, створює основу для подальших досліджень і сталого управління ґрунтами.

Викладення основного матеріалу. На першому етапі дослідження для біоремедіації обрано рослини-сидерати – сорго (*Sorghum bicolor*) і просо (*Panicum miliaceum*), які накопичують органічну масу та покращують структуру і родючість ґрунту, що вказує на їхній потенціал для очищення від нафтового забруднення [15; 16]. Використано 60 кг чистого чорнозему та пісок для дренажу, закуплені в спеціалізованій установі. Для імітації сильного забруднення (46000 мг/кг, згідно з Наказом № 171 МОЗ України [3]) змішано 30 кг ґрунту з 1,5 л дизельного пального та 150 мл напівсинтетичної моторної оливи. Цей рівень близький до реальних показників після витоків нафтопродуктів у Харківській області внаслідок воєнних дій. Експеримент проводили з 42 лабораторними ємностями (табл. 1).

На основі даних табл. 1 створено діаграму, що відображає середню вагу рослин (г) під час біоремедіаційного відновлення ґрунту (Рис. 2).

Згідно рис. 2, середня вага рослин у контрольному ґрунті (групи 1–6) була значно вищою, ніж у забрудненому (групи 7–12). Найбільшу біомасу в контрольному ґрунті показали рослини 3-ї (15,0 г) та 5-ї (15,9 г) груп, що свідчить про високу родючість культур у сприятливих умовах. Використання ґрунтових бактерій підвищувало біомасу рослин у контрольному ґрунті на 4%, а в забрудненому – на 20%, причому найкращий результат показало сорго в 11-й групі.

Додатково для мікробної біоремедіації використовувався препарат «Біонорма» з ґрунтовими бактеріями *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas aureofaciens*, *Pseudomonas putida*, які мають підвищену бактерицидну та фунгіцидну активність. Лабораторні матеріали включали колориметричні тест-смужки, ваги, колби, піпетки, мікроскоп, рН-метр, дистильовану воду та фільтрувальний папір. Для цифрового моніторингу використано мікрокомп'ютер Raspberry Pi5 з датчиком BME280 (тиск, температура, вологість), камери 2E FHD та Raspberry Pi5 OV5640 5MP, а також ПК для обробки даних (AMD Ryzen 9 5950X, 64 GB RAM, GTX1080 8GB).

На першому етапі дослідження застосовано як базовий метод фіторемедіації (використання рослин для поглинання забруднювачів), так і метод мікроб-

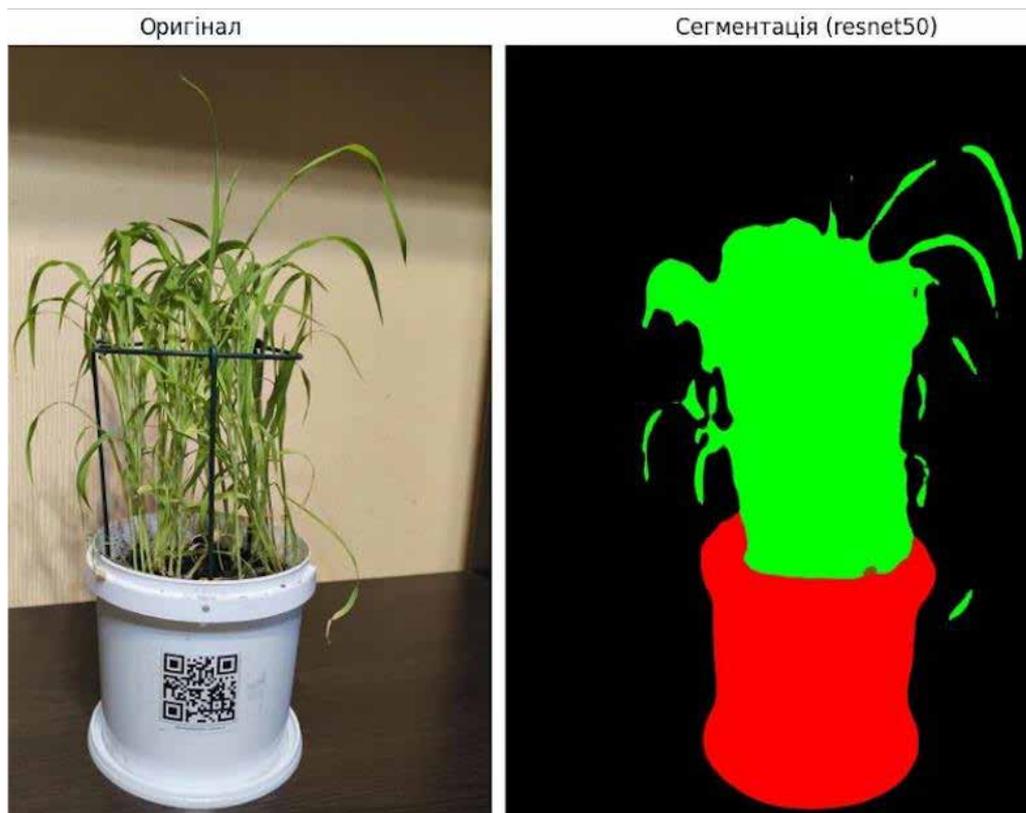


Рис. 1. Виокремлення зеленої маси рослини за допомогою методу «комп'ютерного зору»

Таблиця 1

Групи та результати першого етапу біоремедіаційного відновлення ґрунту

Досліджуваний ґрунт	Рослини/без рослин	Група, №	Кількість ємностей, шт.	Середня вага, г	Об'єм охоплення кореня, см ³
контрольний ґрунт	просо	1 група	3	7,5	147,7
	сорго	2 група	3	13,3	133,3
	суміш (просо+сорго)	3 група	3	15,0	248,3
контрольний ґрунт	просо + ґрунтові бактерії	4 група	3	9,8	85,0
	сорго + ґрунтові бактерії	5 група	3	15,9	39,7
	суміш (просо+сорго) + ґрунтові бактерії	6 група	3	10,8	132,0
забруднений ґрунт	просо	7 група	3	1,8	9,0
	сорго	8 група	3	2,5	32,7
	суміш (просо+сорго)	9 група	3	2,5	24,7
забруднений ґрунт	просо + ґрунтові бактерії	10 група	3	2,7	14,0
	сорго + ґрунтові бактерії	11 група	3	4,0	30,0
	суміш (просо+сорго) + ґрунтові бактерії	12 група	3	3,9	24,0
забруднений ґрунт	без рослин + ґрунтові бактерії	13 група	3	-	-
забруднений ґрунт	без рослин	14 група	3	-	-

ної біоремедіації (введення бактерій для розкладання вуглеводнів), а також комбінований варіант із використанням бактеріальних консорціумів разом із рослинними агентами.

Фіторемедіація полягала у висадженні рослин у забруднені зразки для оцінки їхньої здатності трансформувати токсини. Мікробна біоремедіація передбачала інокуляцію бактерій *Pseudomonas*, які

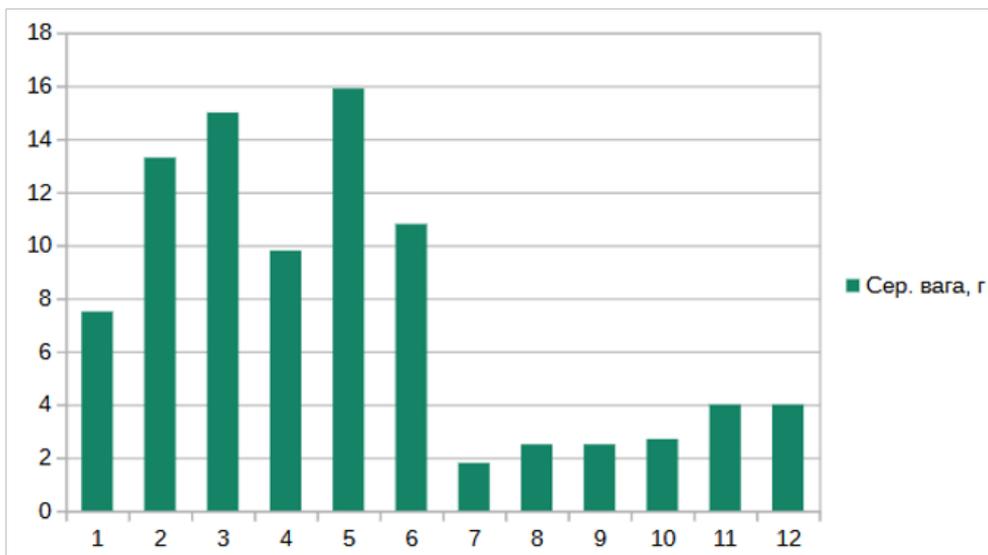


Рис. 2. Середня вага рослин (г) біоремедіаційного відновлення ґрунту

використовують вуглеводні як джерело енергії, мінералізуючи їх до CO_2 , H_2O та біомаси. Комбінований метод поєднував рослини з бактеріями для синергетичного ефекту.

Експеримент проводився в лабораторних умовах з 12 групами зразків (по 3 смості в кожній): контрольні (чистий ґрунт) та забруднені (нафтопродукти) з варіаціями рослин (просо, сорго, суміш) та бактерій з фіксацією динаміки росту (табл. 2 та 3). Повторний посів (групи 13–14) оцінював залишкову токсичність.

Результати експериментального дослідження біоремедіаційного відновлення ґрунтів у лабораторних умовах показали, що в контрольних групах рослини формували значно більшу біомасу та об'єм коренів, ніж у забруднених (зниження на 70–90% через токсичність). Використання бактерій *Pseudomonas* у чистому ґрунті зменшувало кореневу систему, але стимулювало зелену масу; у забрудненому – нейтралізувало токсини, підвищуючи біомасу на 20%.

Найефективнішими виявилися сорго та суміш (просо + сорго) з бактеріями, що сприяло формуванню «гістоподібної» структури ґрунту через екзополісахариди. Повторний посів підтвердив самоочищення ґрунту (група 14) та посилення мікробами (група 13).

Агрохімічні дослідження виявили зміну рН (рис. 3) з кислої (6.0–6.8) до нейтральної (6.8–7.2) після ремедіації, використання нітратів мікробами та зменшення важких металів (мідь не виявлена). Мікроскопія підтвердила гідрофобність забрудненого ґрунту та її зникнення після очищення.

Отримані результати (рис. 4) свідчать про високу ефективність комбінованої біоремедіації для відновлення чорноземів Лівобережної України.

Головні висновки.

1. Сорго в комбінації з бактеріями *Pseudomonas* демонструє найвищу ефективність у зниженні рівня нафтозабруднення та відновленні родючості ґрунтів. Суміш сорго та проса з бактеріями забезпечує стабільну динаміку росту.

Таблиця 2

Результати дослідження середньої площі зеленої маси та висоти рослин визначених «комп'ютерним зором» (Групи-1-6)

Дата	Середня площа зеленої маси, cm^2						Середня висота рослин, см					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
01.07.25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16.07.25	18,5	115,0	74,9	78,4	236,1	44,1	7,7	13,1	14,0	8,5	14,3	13,1
20.07.25	38,3	212,9	138,7	109,1	366,7	84,4	13,4	22,9	21,8	12,5	22,5	20,2
21.07.25	73,4	273,0	243,4	143,0	431,4	128,7	18,2	28,3	29,4	16,1	27,6	22,4
31.07.25	123,5	406,7	370,5	184,3	503,2	198,2	23,2	38,8	38,8	20,9	33,8	25,8
11.08.25	184,2	373,2	525,3	208,4	392,7	204,9	34,5	37,5	41,2	22,3	35,7	30,0
22.08.25	210,7	396,7	470,5	244,1	410,7	293,5	34,0	42,5	47,5	33,4	37,4	34,0
07.09.25	259,8	537,6	515,5	315,2	484,2	355,4	37,5	43,9	49,5	40,4	41,5	39,8

**Результати дослідження середньої площі зеленої маси та висоти рослин
визначених «комп'ютерним зором» (Групи-7-12)**

Дата	Середня площа зеленої маси, см ²						Середня висота рослин, см					
	7	8	9	10	11	12	7	8	9	10	11	12
01.07.25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16.07.25	0,1	6,2	2,2	1,1	40,9	15,7	1,2	6,0	4,6	2,2	8,1	6,4
20.07.25	0,2	10,0	3,7	1,9	65,9	28,9	1,6	9,7	7,8	2,4	12,0	10,4
21.07.25	0,4	13,0	4,7	2,6	99,6	39,0	1,9	12,2	9,8	2,6	16,1	13,0
31.07.25	0,4	15,9	6,2	3,4	71,4	57,0	1,8	14,6	10,7	2,9	16,3	15,0
11.08.25	0,2	14,6	7,1	5,6	62,8	54,2	1,3	12,8	10,1	3,2	16,4	14,8
22.08.25	0,3	13,6	6,2	3,8	51,0	55,2	2,1	11,0	9,3	4,0	15,6	13,2
07.09.25	0,2	12,1	5,1	2,6	55,5	45,2	1,5	10,7	9,1	3,7	16,4	11,5



Рис. 3. Приклад дослідження колориметричними тест-смужками



Рис. 4. Наочний стан ґрунтів після біоремедіації

2. Бактерії *Pseudomonas* нейтралізують токсичний вплив нафтопродуктів, підвищуючи біомасу рослин на 20% у забрудненому ґрунті та сприяючи утворенню органо-мінеральних агрегатів через екзополісахариди.

3. Метод «комп'ютерного зору» забезпечує точну й об'єктивну оцінку параметрів рослин, що дозволяє автоматизувати моніторинг біоремедіації та зменшити похибки порівняно з ручними методами.

4. Ґрунти мають природну здатність до часткового самоочищення, яка посилюється за комбінованого використання рослин і бактерій.

5. Біоремедіація сприяє відновленню структури ґрунту, зниженню вмісту важких металів і підвищенню родючості, що є важливим для аграрного сектору.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати можуть бути використані для розробки рекомендацій із рекультивациі нафтозабруднених ґрунтів, зокрема у регіонах Лівобережної України – Харківській, Донецькій, Луганській, Сумській та Запорізькій областях.

Застосування сорго та бактерій *Pseudomonas* є економічно доцільним і екологічно безпечним рішенням для відновлення аграрних угідь у поствоєнний період. Метод «комп'ютерного зору» може бути масштабованим для польових умов, що дозволить автоматизувати моніторинг біоремедіації на великих територіях. Інтеграція з дронами та супутниковими системами може підвищити ефективність оцінки стану ґрунтів. Отримані дані створюють основу для подальшого вивчення комбінованих біоремедіаційних технологій, зокрема тестування інших рослин і мікроорганізмів, а також впливу різних рівнів забруднення на ефективність очищення. Також, результати можуть бути включені до навчальних програм з агроекології, ґрунтознавства, екологічного менеджменту та біотехнологій, сприяючи підготовці фахівців для вирішення екологічних викликів.

Рекомендації щодо використання біоремедіації можуть бути інтегровані в національні та регіональні стратегії сталого розвитку, зокрема для управління ґрунтовими ресурсами та відновлення екосистем у зонах воєнного впливу.

Література

1. Шуміло Л., Дрозд С., Куссуль Н. Використання супутникових даних у дослідженні екологічних та економічних наслідків війни для сільськогосподарського сектору в Україні. UWEC (Ukraine War Environmental Consequences Work Group). URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/satellite-data-aids-the-study-of-the-wars-environmental-and-economic-consequences-for-ukraines-agriculture-sector/> (дата звернення: 13.10.2025).
2. Геопросторова система моніторингу впливу війни на сільське господарство України за супутниковими даними : проєкт 2023.04/0039 Національного фонду досліджень України. URL: <https://mmda.ipt.kpi.ua/geospatial-monitoring-system-for-the-war-impact-on-the-agriculture-of-ukraine-based-on-satellite-data/> (дата звернення: 17.10.2025).
3. Методики визначення розмірів шкоди, зумовленої забрудненням і засміченням земельних ресурсів через порушення природоохоронного законодавства : Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки № 171 від 20.10.1997 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0285-98#Text> (дата звернення: 17.10.2025).
4. Гангало І.М., Лісовий Д.О., Жебка В.В. Розпізнавання об'єктів за допомогою технологій комп'ютерного зору. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2022. № 4(77). С. 46-52. DOI:10.31673/2412-4338.2022.044652
6. Диняк О.В., Кошлякова І.Є. Потенційна небезпека для довкілля та населення від нафтохімічного забруднення геологічного середовища в наслідок бойових дій. *Екологічні науки*. 2023. № 6(51). С. 136-141. DOI: 10.32846/2306-9716/2023.eco.6-51.22
7. Бондар Т. О., Веденіна М. В. Екологічні проблеми під час війни в Україні: вплив нафтопродуктів на сільськогосподарські рослини : матер. XXX Міжнар. наук.-практ. конф. «Modern information technologies in education and science». 29-31 липня, 2024 р. Прага, Чехія. С. 7-9.
8. Босюк А. С., Шестопапов О. В., Разно М. Р. Біоіндикація як метод визначення якості ґрунту та впливу забруднювачів на флору: аналіз інгібіторної дії на ріст коренів та вплив хімічних речовин на проростання та ріст рослин. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 84-89. DOI: 10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.12
9. Бондар Т. О., Веденіна М. В., Шестопапов О. В. Фітотоксичний ефект нафтопродуктів на сільськогосподарські рослини : експериментальне дослідження : матер. IX Міжнар. наук.-практ. конф. «Research of young scientists : from idea generation to project implementation». October 28-30, 2024. Lyon, France. С. 11-14.
10. Бондар Т. О., Веденіна М. В. Забруднення ґрунтів нафтопродуктами під час війни в Україні : матер. Всеукраїнської наук.-практ. конф. «Українська етнічна культура в глобалізованому світі». 2025. Житомир, Україна.
11. Бондар Т.О., Босюк А.С., Нечипоренко Д.І., Ліфер В.С., Мельник І.В. Оцінка впливу нафтопродуктів на розвиток сільськогосподарських рослин. *Український журнал природничих наук*. № 11. С. 250–259. DOI: 10.32782/naturaljournal.11.2025.27
12. Agnello A. C., Bagard M., van Hullebusch E. D., Esposito G., Hugueno D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons co-contaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation. *Science of The Total Environment*. 2016, № 563–564. P. 693–703. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.10.061
13. Žaltauskaitė J., Meištininkas R., Dikšaitytė A., Degutytė-Fomins L., Mildažienė V., Naučienė Z., Žūkienė R., Koga K. Heavy fuel oil-contaminated soil remediation by individual and bioaugmentation-assisted phytoremediation with *Medicago sativa* and with cold plasma-treated *M. sativa*. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024. № 31(20). P. 30026–30038. DOI: 10.1007/s11356-024-33182-4
14. Ashraf S., Ali Q., Zahir Z. A., Ashraf S., Asghar H. N. Phytoremediation: Environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2019. 174. P. 714–727. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.02.068

15. Melnychenko V. Phytoremediation of soils contaminated as a result of military and anthropogenic impact. *Naukovi Dopovidi Nacional'nogo Universitetu Bioresursiv i Prirodokoristuvannâ Ukraïni*. 2024. № 20(4). P. 72–84. DOI: 10.31548/dopovidi/3.2024.72
16. Нікітенко М. П., Аверчев О. В. Вирощування проса в умовах Півдня України. *Таврійський науковий вісник*. 2020. № 116. Частина 2. С. 47-55. DOI: 10.32851/2226-0099.2020.116.2.7
17. Правдива Л. А. Агротехнологічні основи вирощування сорго звичайного двокольорового в лісостепу України : дис. ... д-ра с.-г. наук : 06.01.09. Київ, 2023. 490 с.
18. Разно М. Р., Тихомирова Т. С., Босюк А. С., Шестопапов О. В. Дослідження процесу побутового компостування органічних відходів рослинного походження. *Екологічні науки*. 2025. № 1 (58). С. 316-323. DOI: 10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.51

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 502.521

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.28>

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВНАСЛІДОК ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Хижняк С.В., Корнієнко В.І., Самкова О.П., Мідик С.В., Коверсун І.В., Войціцький В.М.
Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ
khs2014@ukr.net

Акцентується увага на тому, що глобальною екологічною проблемою внаслідок військових дій, є забруднення довкілля, зокрема ґрунтів, які є основою наземних екосистем і критично важливим ресурсом для сільськогосподарської діяльності. При комплексній оцінці екологічних наслідків впливу військових дій на ґрунти використовуються аналітичні методи для встановлення основних забрудників. Поряд з цим, необхідне використання методів біотестування для виявлення екологічної токсичності ґрунтів, що необхідно для створення адекватної стратегії відновлення уражених територій.

Представлено результати досліджень забруднення та зміни еколого-токсикологічного стану ґрунту внаслідок військових дій (територія Снігурівської ОТГ, Миколаївська обл.). В зоні влучання артилерійських снарядів встановлено деградацію та дегуміфікацію ґрунту та його забруднення на ділянках, що знаходяться на відстані 5 та 10 м від центру вибуху. Встановлено 2-3 разове зростання валового вмісту кадмію, свинцю, миш'яку, ртуті та бору у ґрунті на відстані 5 м від центру вибуху. На забруднених ділянках ґрунту виявлено в 2-3 рази перевищення ГДК для миш'яку та сірки. Проведений скринінг вмісту нітроароматичних сполук свідчить про перевищення у ґрунті вмісту 4-аміно-2,6-динітротолуолу. Методом біотестування за використання ґрунтових черв'яків *Eisenia fetida* показана надзвичайна екотоксичність забрудненого ґрунту, що передбачає необхідність подальших досліджень можливого вмісту інших забруднювачів у ґрунті. Отримані результати свідчать, що наслідком військових дій може бути дегуміфікація та забруднення ґрунтового покриву. Комплексне забруднення ґрунтів впливає на екологічну стабільність, оскільки сукупний вплив може посилити тяжкість забруднення довкілля, включаючи токсичність та руйнування екосистеми. *Ключові слова:* військові дії, деградація ґрунту, забруднення ґрунту, важкі метали, біотестування.

Basic approaches for comprehensive assessment of soil pollution resulting from military actions. Khyznyak S., Kornienko V., Samkova O., Midyk S., Koversun I., Voitsitskiy V.

It is emphasized that a global environmental problem resulting from military actions is environmental pollution, particularly of soils, which form the basis of terrestrial ecosystems and a critical resource for agricultural activities. A comprehensive assessment of the environmental impacts of military actions on soils uses analytical methods to identify key pollutants. Bioassay methods are also necessary to determine the ecological toxicity of soils, which is necessary to create an adequate strategy for the restoration of affected areas.

The results of studies on soil pollution and changes in the ecological and toxicological state of soil as a result of military actions (territory of Snihurivka Territorial Community, Mykolaiv region) are presented. In the area where artillery shells hit, soil degradation and dehumification, as well as contamination, were observed in areas located 5 and 10 m from the center of the explosion. A 2-3-fold increase in the total content of cadmium, lead, arsenic, mercury and boron in the soil was detected at a distance of 5 m from the center of the explosion. In contaminated soil areas, arsenic and sulfur levels exceeding the maximum permissible concentration by 2-3 times were detected. Screening for nitroaromatic compounds indicates an excess of 4-amino-2,6-dinitrotoluene in the soil. Biotesting using earthworms *Eisenia fetida* demonstrated the extreme ecotoxicity of the contaminated soil, suggesting the need for further research into the possible content of other contaminants in the soil. The obtained results indicate that military actions may result in dehumification and contamination of the soil surface.

Complex soil contamination affects ecological stability, since the cumulative impact can increase the severity of environmental pollution, including toxicity and destruction of the ecosystem. *Key words:* military actions, soil degradation, soil contamination, heavy metals, biotesting.

Постановка проблеми. Повномасштабні бойові дії, які тривають на території України з 24 лютого 2022 р., спричиняють значний вплив на екологічний стан довкілля, зокрема ґрунти, що є основою наземних екосистем і критично важливим ресурсом для сільськогосподарської діяльності. На сьогодні, зони військових дій вважають одним із основних джерел забруднення наземних екосистем, що потребує моніторингових досліджень для розроблення заходів ремедіації [1, 2].

Застосування зброї різного виду, чисельні вибухи артилерійських снарядів та ракет, пожежі призводять до потрапляння у навколишнє природне сере-

довище різноманітних хімічних сполук та газів, металевих фрагментів снарядів. Утворення кратерів або вирв від бомб та артилерійських снарядів змінюють структуру ґрунту. Крім того, внаслідок вибухів пошкодженню піддається сільськогосподарська техніка, різноманітні складські приміщення, що є додатковим джерелом забруднення довкілля, зокрема сільськогосподарських угідь. Комплексна оцінка екологічних наслідків впливу військових дій на ґрунти із використанням аналітичних методів досліджень застосовується для встановлення основних забрудників. Крім того, необхідне використання методів біотестування для виявлення екологічної токсично-

сті, що необхідно для створення адекватної стратегії відновлення уражених територій.

Актуальність дослідження. Грунт відіграє ключову роль в природних та агроекосистемах. Однак йому все більше загрожують такі забруднювачі, як промислові та міські стічні води, тверді відходи, пестициди, добрива тощо [3]. Найбільш поширеним та небезпечним є хімічне забруднення ґрунтів: токсичними сполуками, важкими металами чи продуктами горіння. Зміна хімічного складу ґрунту, зокрема, складноє його використання у сільськогосподарській практиці.

Військові дії спричиняють значні руйнування екосистем, що мають довгострокові наслідки для сільського господарства та водних ресурсів. Під час військових дій відбувається механічне та фізичне руйнування ґрунтів. Хімічне забруднення ґрунтів внаслідок військових дій характеризується забрудненням вибуховими речовинами, токсичними елементами (важкими металами) та іншими. Серед вибухових речовин переважають нітроароматичні сполуки, які зазвичай достатньо стабільні у ґрунті через стійкість до випаровування, гідролізу та біодеградації [4].

Забруднювачі ґрунтів – це хімічні речовини, які присутні у вищих кількостях, ніж у будь-якій іншій частині навколишнього середовища. Проведення аналізу щодо вмісту токсичних забруднювачів у ґрунті повинно супроводжуватись оцінкою їх екологічності для встановлення біологічної спроможності ґрунту.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Глобальною екологічною проблемою є забруднення екосистем токсичними речовинами, особливо внаслідок військових дій. Дослідження з визначення забрудників ґрунтового покриву, оцінки його екологічного стану унаслідок війни є важливим з наукової та практичної точки зору, що дає можливість оцінити безпечність використання ґрунту для людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Збройна агресія російської федерації призвела до широкомасштабного пошкодження ґрунту на великих територіях України [5]. Вибух та детонація боєприпасів призводять до утворення токсичних продуктів, які потрапляють у ґрунт. Використання військової техніки ще більше посилює забруднення території, зокрема продуктами від руйнування та горіння важкої техніки, розливів палива, технічних мастил, що створює небезпеку для здоров'я людини і біоти [6].

Забруднення важкими металами внаслідок антропогенної діяльності, є основною причиною забруднення довкілля, головним чином через функціонування різних галузей промисловості (різноманітні підприємства металургійної, хімічної, електротехнічної та інших промисловостей, видобування корисних копалин тощо), викиди і скиди транспортного

комплексу, спалювання викопних джерел енергії (вугілля, нафти, газу, торфу). Використання важких металів у сільськогосподарській галузі є вторинним джерелом забруднення важкими металами [7].

Важкі метали – класичні забруднювачі довкілля. Відповідно до державних стандартів токсичні хімічні елементи розділені за класами гігієнічної небезпеки [3]: 1-ший, найбільш небезпечні: миш'як (As), берилій (Be), ртуть (Hg), селен (Sn), кадмій (Cd), свинець (Pb), цинк (Zn), фтор (F); 2-гий, високо небезпечні: хром (Cr), кобальт (Co), бор (B), молібден (Mn), нікель (Ni), мідь (Cu), сурма (Sb); 3-тій, помірно небезпечні: барій (Ba), ванадій (V), вольфрам (W), марганець (Mn), стронцій (Sr).

Повномасштабна війна російської федерації проти України спричинила екоцид. Усі наслідки військових дій неможливо усвідомити до їхнього закінчення, а прогнози можливі тільки в узагальненому вигляді [8, 9]. Вже зараз повністю або майже повністю зруйновані десятки міст, селищ, сіл, тисячі будівель житлового, комунального інфраструктурного фонду, підприємств тощо. Наразі вже згоріло тисячі гектарів лісів, забруднено вже більше 5 млн. гектарів земель сільськогосподарського призначення, в тому числі важкими металами. В місцях бойових дій вміст важких металів в ґрунті подекуди перевищує фонові значення в 30 разів. На місцях обстрілів у 10–18 разів визначено перевищення вмісту Hg, Zn та Cd, а також зафіксовано високий вміст Cu, Pb, P, S і Ba [10]. Причому, враховуючи, що важкі метали не піддаються мікробному чи хімічному розкладу, навіть при незначному збільшенні їх вмісту, вони залишаються в ґрунті тривалий час та можуть потрапляти у харчовий ланцюг [11].

Дедалі більше результатів досліджень підтверджує потенційні джерела викидів різних забруднювачів у довкілля, пов'язаних із військовою діяльністю. Показано, що ґрунти на території військових об'єктів упродовж багатьох років залишаються забрудненими токсичними сполуками [12]. Переважна більшість цих сполук є стійкими до біологічного розкладання, а, отже, залишаються в біосфері. Вони стають джерелом забруднення, потенційно шкідливим для довкілля та здоров'я людини через їх можливий токсичний вплив.

На сьогодні, дослідження з визначення забрудників ґрунтового покриву, оцінки його екологічного стану унаслідок війни проводяться в різних регіонах України на територіях де велися активні бойові дії, а також і на постраждалих унаслідок ракетних атак [13, 14].

Враховуючи, що поведінка більшості забрудників у ґрунтах України вивчена недостатньо, це потребує подальших досліджень в цьому напрямі.

Новизна. У роботі представлені дослідження впливу військових дій на забруднення ґрунту біля с. Киселівка Миколаївської області та його еколого-токсикологічний стан.

Викладення основного матеріалу. Зразки ґрунту відібрано у квітні та червні 2025 р. біля с. Киселівка, Снігурівська ОТГ, Миколаївська обл., де наявне пошкодження ґрунтового покриву від артилерійських та мінометних обстрілів та виявлено залишки сільськогосподарських будівель (рис. 1).

Відбір зразків ґрунту проведено відповідно чинних стандартів [15, 16]. Зразки ґрунту на Ділянці № 1 (розташована на відстані 5 м від центру вибуху) та Ділянці № 2 (розташована на відстані 10 м від центру вибуху) відбирали на глибині 0–20 см. Формували змішаний зразок із 10-ти проб ґрунту з кожної ділянок відбору.

Визначали валовий вміст важких металів (елементів) [17] та вміст нітроароматичних сполук у ґрунті [18].

Результати експериментальних досліджень були проаналізовані за використання програмного пакета Microsoft Excel.

Ґрунт у зоні проведення досліджень (с. Киселівка, Снігурівська ОТГ, Миколаївська обл.) представлений переважно чорноземом південним важкосуглинковим. Він характеризується рН близьким до нейтральних (рН 7,4) та дуже високим вмістом органічної речовини (табл. 1). Визначення показників якості ґрунту дослідних ділянок (табл. 1) свідчить про значне зниження вмісту органічної речовини (приблизно в 2.3 та 6.5 рази для Ділянки 1 та 2 відповідно), що дозволяє віднести його до деградованих та дегуміфікованих.

Валовий вміст важких металів розглядають як індикатори воєнно-техногенного навантаження [19]. В Таблиці 2 представлено результати вмісту елементів в забрудненому ґрунті (Ділянка 1 та 2). Слід відмітити, що виявлений низький вміст органічної речовини у забрудненому ґрунті підвищує рухомість важких металів та їх міграцію у нижчі шари.



Рис. 1. Вид ділянок ґрунтового покриву внаслідок військових дій (Миколаївська обл., с. Киселівка, червень 2025 р.)

Таблиця 1

Показники якості фонового ґрунту (контроль) та у ґрунті в зоні влучання артилерійських снарядів (Миколаївська обл., с. Киселівка), ($\bar{x} \pm SD$)

Найменування показників, одиниці вимірювань	Ґрунт фоновий (контроль)	Ділянка 1	Ділянка 2
pH водної витяжки, одиниці pH	8,3±0,1	8,1±0,1	8,2±0,1
pH сольової витяжки, одиниці pH	7,4±0,1	7,6±0,1	7,7±0,1
Органічна речовина (гумус), %	5,2±0,5	0,8±0,1	1,8±0,1

Примітка: тут та далі: Ділянка № 1 розташована на відстані 5 м, а Ділянка № 2 – на відстані 10 м від центру вибуху (Миколаївська обл., с. Киселівка).

Таблиця 2

Вміст елементів (валові форми) у ґрунті в зоні влучання артилерійських снарядів, 0–20 см, мг/кг ґрунту (Миколаївська обл., с. Киселівка). Результати подано на повітряно-суху речовину

Найменування показників, мг/кг ґрунту	Ділянка 1	Ділянка 2	ГДК у ґрунті, мг/кг ^(20,21)
Масова частка загального алюмінію (Al)	17,89±1,31	22,21±1,58	не нормується
Масова частка загального бору (B)	25,30±4,98	8,86±2,04	30,0
Масова частка загального барію (Ba)	84,16±13,82	121,04±18,81	200,0
Масова частка загального берилію (Be)	-	0,86±0,28	не нормується
Масова частка загального вісмуту (Bi)	<0,10	0,19±0,03	не нормується
Масова частка загального кадмію (Cd)	1,89±0,45	0,99±0,22	3,0
Масова частка загального кобальту (Co)	12,91±2,81	12,52±2,74	не нормується
Масова частка загального хрому (Cr)	23,09±4,61	27,44±5,33	не нормується
Масова частка загального міді (Cu)	11,77±2,60	13,29±2,88	не нормується
Масова частка загального заліза (Fe)	17 000±126	20 650±148	не нормується
Масова частка загального літію (Li)	15,96±3,36	21,73±4,37	не нормується
Масова частка загального магнію (Mg)	5 350±470	6 000±520	не нормується
Масова частка загального марганцю (Mn)	387,79±50,59	460,38±58,53	1500,0
Масова частка загального нікелю (Ni)	29,80±5,72	31,93±6,06	50
Масова частка загального свинцю (Pb)	16,90±2,53	9,19±2,11	32
Масова частка загального стронцію (Sr)	87,33±14,26	112,72±17,71	не нормується
Масова частка загальної сірки (S)	-	397,00±51,61	160,0
Масова частка загального цинку (Zn)	83,47±13,72	67,99±11,53	не нормується
Масова частка загального миш'яку (As)	7,6±1,2	5,90±0,90	2,0
Масова частка загальної ртуті (Hg)	2,0±0,6	0,30±0,05	2,1

Визначений валовий вміст елементів свідчить про відмінності у їх накопиченні на Ділянках 1 та 2, зокрема, вміст таких небезпечних елементів як кадмій, свинець, миш'як, ртуть та бор у 2–3 рази більше на Ділянці 1. Крім того, на Ділянках 1 та 2 виявлено в 2–3 рази перевищення ГДК для миш'яку та сірки.

Миш'як, ртуть та кадмій відносяться до I класу небезпеки, характеризуються надзвичайною токсичністю навіть у незначних концентраціях. Їх накопичення у ґрунті погіршує його стан, призводить до хімічного пошкодження. Ці речовини легко мігрують у ґрунтах, швидко засвоюються і накопичуються у рослинах. Через забруднені продукти харчування рослинного та тваринного походження вони потрапляють до організму людини.

Використання нітроароматичних сполук у різних сферах промисловості призводить до їхнього негативного впливу на довкілля [22]. При нинішній ситуації в Україні накопичення цих сполук в об'єктах довкілля значно зростає, оскільки нітроз'єднання є продуктами використання вибухових речовин внаслідок активного ведення бойових дій. Проведений скринінг вмісту нітроароматичних сполук у досліджуваних ґрунтах свідчить про перевищення вмісту 4-аміно-2,6-динітротолуолу, що становить 0,242±0,012 мг/кг.

Екотоксичність забрудненого ґрунту (Ділянка 1 та Ділянка 2) оцінювали за використання ґрунтових організмів – ґрунтові черви *Eisenia fetida*, які є типовими представниками ґрунтових безхребетних.

Таблиця 3

Оцінка екотоксичності ґрунту у контролі (фоновий ґрунт) та у зоні влучання артилерійських снарядів (Миколаївська обл., с. Киселівка) за використання черв'я *Eisenia fetida*, ($\bar{x} \pm SD$, n=30 по варіанту)

Показники, одиниці вимірювань	Контроль (штучний ґрунт)	Контроль (фоновий ґрунт)	Ділянка 1		Ділянка 2	
			500	250 + 250 (штучний ґрунт)	500	250 + 250 (штучний ґрунт)
Загальна вага ґрунту, г	500	500	500	250 + 250 (штучний ґрунт)	500	250 + 250 (штучний ґрунт)
Біомаса черв'я: початок дослідження – 14 діб –	5,28±0,21 5,06±0,19	4,88±0,30 4,53±0,29	4,52±0,25 –	4,32±0,15 1,52±0,15	4,18±0,14 –	4,92±0,41 2,12±0,11
Середня втрата ваги, %	4.2	7.2	-	65	–	57
Смертність 14 діб, %	0	0	100	70	100	50

Відіграючи важливу роль у ґрунтоутворюючих процесах, ці організми є чутливими індикаторами змін екологічного стану середовища існування, що дозволяє використовувати їх в якості тест-об'єкта при проведенні біотестування [23]. При встановленні токсичності досліджуваних ґрунтів використовували тест на гостру токсичність (14-ти добова експозиція) [24]. Контролем слугував штучний ґрунт наступного складу: тонко розмелений торф (10 %), каолінова глина (20 %), кварцовий пісок (70 %) вмісту на суху масу.

Згідно отриманих результатів (табл. 3) встановлено, що за період експозиції (14 діб) не спостерігалось смертності ґрунтових черв'я *Eisenia fetida* у контролі (штучний ґрунт) та контролі (фоновий ґрунт). Однак, за використання ґрунту Ділянка 1 та 2 спостерігалась 100 % смертність особин. Причому при змішування забрудненого ґрунту із контрольним (50:50), тобто при наявності 1/2 ґрунту Ділянки 1 смертність становила – 70 %, а 1/2 ґрунту Ділянки 2 смертність становила – 50 %. Середня втрата біомаси черв'яків у контролі (штучний ґрунт) становить 4,2 %. Тобто, отримані результати є достовірними по критерію середньої втрати біомаси, яка не перевищувала 20 %. Для фонового ґрунту втрата біомаси черв'яків становила 7,2 %, а при 1/2 ґрунту Ділянки 1 та 2 – 65 та 57 % відповідно (табл. 3). Спостереження за поведінковими реакціями *Eisenia fetida* на 14 добу дослідження свідчать, що у варіантах контролю (штучний ґрунт) та фоновий ґрунт тест-об'єкти були рухливі та реагували як на світлове,

так і на механічне подразнення. За використання ґрунту з Ділянки 1 та 2 (1/2 досліджуваного ґрунту) тест-об'єкти м'яко реагували як на світлове, так і на механічне подразнення, та дуже повільно рухались. Таким чином, забруднені ґрунти Ділянок 1 та 2 проявляють високу токсичність щодо ґрунтових черв'я *Eisenia fetida*.

Аналізуючи отримані результати слід підкреслити необхідність подальших досліджень щодо вмісту інших забрудників ґрунту (Ділянка 1 та Ділянка 2), враховуючи їх надзвичайну екотоксичність.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження. Внаслідок військових дій (територія Снігурівської ОТГ, Миколаївська обл.) в зоні влучання артилерійських снарядів встановлено деградацію та дегуміфікацію ґрунту та його забруднення у шарі 0–20 см, а також погіршення еколого-токсикологічного стану. Зафіксовано у 2–3 разове зростання валового вмісту кадмію, свинцю, миш'яку, ртуті та бору у ґрунті на відстані 5 м від центру вибуху. На забруднених ділянках виявлено в 2–3 рази перевищення ГДК для миш'яку та сірки, а також вмісту 4-аміно-2,6-динітролоуолу. Методом біотестування за використання ґрунтових черв'я *Eisenia fetida* показана надзвичайна екотоксичність забрудненого ґрунту. Подальші дослідження мають бути спрямовані на встановленні вмісту інших можливих забруднювачів у ґрунті, оскільки їх сукупний вплив може мати різні екологічні наслідки, включаючи токсичність та руйнування екосистеми.

Література

- Fayiga A.O. Remediation of inorganic and organic contaminants in military ranges. *Environ. Chem.* 2019; 16: 81–91.
- Герасимчук Л. О. Військові дії як чинник утворення відходів. *Таврійський науковий вісник.* 2023; 133: 305 – 312. DOI: <https://doi.org/10.32782/226-0099.2023.133.41>.
- Глобальне здоров'я. Якість і безпека життя. Довідник-монографія. В 3-х томах / В.М. Войціцький та ін. Київ: ЦК «Компринт». 2019; 1-3: 640 с.

4. Certini G., Scalenghe R., Woods W.I. The impact of warfare on the soil environment. *Earth-Science Reviews*. 2013; 127: 1–15. DOI: 10.1016/j.earscirev.2013.08.009
5. Dmytrukha N.M., Kozlov K.P., Herasimova O.V. Soil contamination with heavy metals: a hygienic concern. *Ukrainian Journal of Occupational Health*. 2024; 20 (1): 66–75. <https://doi.org/10.33573/ujoh2024.01.066>].
6. Дмитренко О.В., Дем'янюк О.С., Погоріла Л.П., Сви́динюк Н.Л., Рожа В.В., Кирилюк П.М., Романенко В.М. Екотоксикологічна оцінка дерново-підзолистого ґрунту за впливу бойових дій. *Агроекологічний журнал*. 2023; 4: 89-96. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2023.293758>
7. Безпека. Методи контролю важких металів у довкіллі та сільськогосподарській продукції: навчальний посібник / В. М. Войціцький та ін. Київ: ТОВ «Прінтеко». 2022. 252 с.
8. Військова токсикологія, радіологія та медичний захист / Ю. М. Скалецький та ін. Тернопіль: Укрмедкнига. 2003; 362 с.
9. Войціцький В.М., Хижняк С.В., Коверсун І.В. Основні загрози в сфері екологічної безпеки за військових дій. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток: колективна монографія. Київ: «Юстан». 2022:154 – 157.
10. Матеріали круглого стола Укрінформ 25.01.2024 р. в м. Києві на тему «Екологічна безпека України: національний та міжнародний вимір».
11. Sodhi K.K., Mishra L.C., Singh C.K., Kumar M. Perspective on the heavy metal pollution and recent remediation strategies. *Current Research in Microbial Sciences*. 2022; 2: 100166.
12. Shukla S., Mbingwa G., Khanna S. et al. Environment and health hazards due to military metal pollution: A review. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*. 2023; 20: 100857.
13. Bonchkovskiy O.S., Ostapenko P.O., Shvaiko V.M., Bonchkovskiy A.S. Remote sensing as a key tool for assessing war-induced damage to soil cover in Ukraine (the case study of Kyivska territorial hromada). *Journal of Geology Geography and Geoecology*. 2023; 32(3): 474–487.
14. 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 обл. *Агроекологічний журнал*. 2022; 3: 136–149.
15. ДСТУ ISO 10381-1:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 1. Настанови щодо складання програм відбирання проб (ISO 10381-1:2002, IDT).
16. ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 2. Настанови з методів відбирання проб (ISO 10381-2:2002, IDT).
17. ISO/TS 16965:2013 Soil quality, Determination of trace elements using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS).
18. Визначення вмісту нітроароматичних сполук та нітроамінів у ґрунті та у воді методом високоефективної рідинної хроматографії (METHOD 8330A).
19. Сплодитель А., Голубцов О., Чумаченко С., Сорокіна Л. Вплив війни росії проти України на стан українських ґрунтів. Результати аналізу. Київ: ГО Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2023. 32 с.
20. Гігієнічний регламент допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті затверджений наказом МОЗ України № 1595 від 14.07.2020 (<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>)
21. Гранично допустимі концентрації небезпечних речовин згідно з Нормативами гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також перелік таких речовин затверджений Постановою Кабінету
22. Міністрів України від 15 грудня 2021 № 1325.
23. Зульф'яров А.О., Артамонов М.С., Зульф'яров О.С. Хімія вибухових речовин: біорозкладання нітроароматичних сполук. *Єдине здоров'я та проблеми харчування України*. 2023; 2: 48-61.
24. Хижняк С.В., Баранов Ю.С., Демченко В.Ф., Войціцький В. М. Пестициди та їх еколого-токсикологічна оцінка. Київ: РВВ НУБіП України. 2019. 226 с.
25. ДСТУ ISO 11268-1: 2003 Якість ґрунту. Вплив забрудників на земляних черв'яків (*Eisenia fetida*). Частина 1. Визначення гострої токсичності з використанням штучного субстрату (ISO 11268-1:1993, IDT).

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 63.502: 504.57

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.29>

РОСЛИННИЙ БІОАКТИВНИЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ ЗНЕШКОДЖЕННЯ ТОКСИЧНОЇ ДІЇ ГЕРБІЦИДІВ У ГРУНТАХ

Хохлов А.В., Хохлова Л.Й.

Інститут сорбції та проблем ендоекології Національної академії наук України
вул. Генерала Наумова, 13, 03164, м. Київ
techsorb@gmail.com, khokhlova.lyudmila@gmail.com

Однією з найважливіших проблем сьогодення є погіршення екологічного стану довкілля загалом і ґрунтів зокрема. Основним джерелом забруднення ґрунту є внесення агрохімікатів різного типу. Використання різноманітних отрутохімікатів у сільському господарстві призводить до порушення природних циклів і збалансованих умов навколишнього природного середовища. Збільшення та неконтрольоване використання різних марок гербіцидів для боротьби з загрозою бур'янів на сільськогосподарських полях викликає велике занепокоєння, враховуючи вплив гербіцидів на фізіологію сільськогосподарських культур та проростання насіння, коли вони потрапляють у ґрунт. Зростання масштабів застосування гербіцидів, в усьому світі ставить перед дослідниками важливе завдання розробки ефективних заходів попередження наслідків інтенсивної хімізації в агропромисловому комплексі. Встановлено, що накопичення та залишкові концентрації гербіцидів в ґрунті можуть впливати на фізіологію культури, особливо під час росту розсади. Створено біосорбційний композит деструктивного типу на основі рослинних матеріалів для знешкодження агрохімікатів різного хімічного складу. Визначено оптимальні умови модифікування спеціалізованих біосорбційних комплексів деструктивної дії щодо гербіцидів. Проведені дослідження показали високу ефективність дії біосорбційного композиту для очищення ґрунтів від накопичення гербіцидів, що вказує на перспективність його застосування в аграрному секторі. Отримані результати, з урахуванням дешевизни та доступності сировинної бази, дозволяють обґрунтовано підходити до вирішення конкретних практичних задач, пов'язаних з розробкою модифікованих біоактивних сорбційних композитів та їх використання для очищення ґрунтів від накопичених гербіцидів різного типу. Біосорбційні композити з рослинної сировини можуть бути використані як ефективний, доступний, екологічно чистий і недорогий сорбційний матеріал для детоксикації накопичення гербіцидів в ґрунтах. *Ключові слова:* біоактивний композит, гербіциди, ґрунти, токсичні ефекти, сільськогосподарське виробництво, бур'яни, детоксикація.

Plant bioactive composite for reducing the toxic effect of herbicides in the soils. Khokhlov A., Khokhlova L.

One of the most important problems of today is the deterioration of the ecological state of the environment in general and soils in particular. The main source of soil pollution is the use of various types of agrochemicals. The use of various pesticides in agriculture leads to disruption of natural cycles and balanced environmental conditions. The increase and uncontrolled use of various brands of herbicides to combat the threat of weeds in agricultural fields is of great concern, given the impact of herbicides on the physiology of agricultural crops and seed germination when they enter the soil. The growth of the use of herbicides worldwide poses an important task for researchers to develop effective measures to prevent the consequences of intensive chemicalization in the agro-industrial complex. It has been established that the accumulation and residual concentrations of herbicides in the soil can affect the physiology of the crop, especially during the growth of seedlings. To neutralize agrochemicals of various chemical composition, a destructive type biosorption composite based on plant materials has been created. Optimal conditions for modification of specialized biosorption complexes of destructive action on herbicides have been determined. The conducted studies have shown high efficiency of biosorption composite for cleaning soils from accumulations of herbicides, which indicates the prospects of its use in the agricultural sector. The results obtained, taking into account the cheapness and availability of raw materials, allow a reasonable approach to solving specific practical problems related to the development of modified bioactive sorption composites and their use for cleaning soils from accumulated herbicides of various types. Biosorption composites from plant materials can be used as an effective, accessible, environmentally friendly and inexpensive sorption material for detoxification of herbicide accumulations in soils. *Key words:* bioactive composite, herbicides, soils, toxic effects, agricultural production, weeds, detoxification.

Постановка проблеми. Зважаючи на інтенсивність ведення господарювання в Україні та наявний рівень забруднення ґрунтів, важливими є розробка та впровадження новітніх технологій очищення й відновлення ґрунтів, забруднених агрохімікатами. Використання різноманітних отрутохімікатів у сільському господарстві призводить до порушення природних циклів і збалансованих умов навколишнього природного середовища. Забруднення ґрунтів хімічними сполуками, які використовуються в землеробстві, є однією з актуальних проблем сучас-

ності. Доведено, що за трофічними ланцюгами ці хімічні сполуки врешті-решт потрапляють в організм людини. Збільшення та неконтрольоване використання різних марок гербіцидів для боротьби з загрозою бур'янів на сільськогосподарських полях викликає велике занепокоєння, враховуючи вплив гербіцидів на фізіологію сільськогосподарських культур та проростання насіння, коли вони потрапляють у ґрунт. Залучення нових типів біосорбційних матеріалів з відновлюваної рослинної сировини для детоксикації накопичення агрохімікатів в ґрун-

тах актуально як в науковому, так і практичному відношенні.

Актуальність досліджень. Зниження рівня забруднення ґрунту агрохімікатами є однією з важливих проблем захисту навколишнього середовища. Одним зі шляхів вирішення проблеми детоксикації накопичення агрохімікатів у ґрунтах є створення нових типів біосорбційних композитів деструктивної дії з рослинної сировини, в яких мікроорганізми-деструктори закріплюються на сорбційно активних щодо забруднювача носіях.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Забруднення довкілля хімічними сполуками, які використовуються в землеробстві, є однією з актуальних проблем сучасності. Гостро постає проблема рекомендацій з очищення ґрунтів від накопичення агрохімікатів та нівелювання їхньої дії на рослини. Існує небагато досліджень щодо впливу залишкового вмісту гербіцидів з важкими металами, що входять до їх складу, та їхнього впливу на проростання та ріст сільськогосподарських культур [1]. Гербіциди – засоби, які використовують для знищення (чи профілактики) небажаної рослинності. Головне завдання таких препаратів у сільськогосподарських посівах – боротьба проти бур'янів. Збільшення та неконтрольоване використання різних марок гербіцидів для боротьби з загрозою бур'янів на сільськогосподарських полях викликає велике занепокоєння, враховуючи вплив гербіцидів на фізіологію сільськогосподарських культур та проростання насіння, коли вони потрапляють у ґрунт. Показано, що гербіциди негативно впливали на проростання насіння, а також на довжину плодоніжки та корінця, що вказує на їх токсичний вплив на ріст сільськогосподарських культур [2, 3]. Широко застосовується Гліфосат, що вважається найпотужнішим гербіцидом безперервної дії. Це неселективний гербіцид, тобто він вбиває будь-яку рослину, з якою вступає в контакт. Гліфосат дуже ефективний у боротьбі з широким спектром бур'янів, включаючи трави, широколистяні бур'яни та деревні рослини. Методи очищення залежать від рівня забруднення ґрунтів залишковими кількостями гербіцида та для різних регіонів мають специфічні відмінності. На території України найбільш поширені гербіциди: Ураган Форте – неселективний післясходовий гербіцид системної дії для знищення однорічних та багаторічних бур'янів. Діюча речовина – гліфосат/калійна сіль. Препарат містить унікальну поверхнево-активну речовину, яка забезпечує найкращу дію гліфосату; Гербіцид Ватра – системний препарат суцільної дії на основі калійної солі гліфосату, призначений для ефективного знищення однорічних і багаторічних бур'янів, у тому числі чагарників. Використовується як гербіцид для соняшника, кукурудзи, ріпаку, а також для обробки полів перед посівом; Раундап Макс – гербіцид суцільної дії. Діюча речовина – калійна сіль гліфосату. Препарат використовують для обробки території перед посад-

кою овочевих, квіткових, декоративних рослин, дерев, чагарників, газонів, а також для відновлення земель, які тривалий час не оброблялися.

Для очищення екосистем від накопичення гербіцидів існують різні методи. Очищення ґрунтів має певні складності. З метою відновлення ґрунтів та детоксикації накопичених надлишків гербіцидів на рівнях, що не перевищують 20 мг/кг, перспективним є спосіб компостування ґрунту разом із залишками рослин, опалим листям тощо [4, 5]. Наявність підвищених концентрацій гербіцидів у потоках відходів створює проблеми для відновлення навколишнього середовища. Все більшого поширення набуває застосування біотехнологічних методів, що передбачають інтродукцію в природні екосистеми мікроорганізмів-деструкторів агрохімікатів. Доведено, що практично всі хімічні сполуки, що застосовуються як агрохімікати, утилізуються мікроорганізмами. Виділено значну кількість штамів грибів, бактерій, актинобактерій та водоростей, що перетворюють ці речовини до нетоксичних сполук. Переваги використання біологічних методів дезактивації агрохімікатів над фізико-хімічними обумовлені тим, що мікроорганізми мінералізують агрохімікати в природному циклі кругообігу речовин без негативного впливу на екосистему. Метаболічні можливості природної популяції значно вищі, ніж окремо взятого мікроорганізму [6, 7]. Сукупна діяльність консорціуму мікроорганізмів дає змогу довести до повної мінералізації будь-які хімічні сполуки. тоді як цього не може зробити жодна популяція одного виду мікроорганізмів. Існують відомості про різноманітні біологічні препарати для деструкції агрохімікатів [8-10]. Розроблено та застосовуються рідкі мікробні препарати для знешкодження агрохімікатів у ґрунтах [11, 12]. Здатність одного окремо взятого мікроорганізму розкласти ту чи іншу органічну сполуку лімітується індивідуальним генетичним комплексом. Природна популяція бактерій є генетично гетерогенною та щодо ксенобіотиків проявляється на рівні штаму. Знешкодження агрохімікатів шляхом використання мікроорганізмів-деструкторів, як у вільному стані, так й іммобілізованих на поруватому носії, є найбільш доцільним для зниження рівня забруднення ґрунтів [13, 14]. Для очищення ґрунтів від агрохімікатів застосовується мікробний препарат на основі суміші біологічно активного ґрунту та соломи. Іммобілізація мікробних клітин-деструкторів агрохімікатів на поверхні сорбційного носія підвищує ефективність біотехнологічних процесів. Сорбент-носії повинні володіти високою хімічною стійкістю, механічною міцністю, біологічною сумісністю та технологічністю. Актуальним для детоксикації ґрунтів, які забруднені агрохімікатами різного хімічного складу, є створення біосорбційних композитів широкого спектру дії на основі матеріалів рослинного походження та природного консорціуму мікроорганізмів-деструкторів. Рослинні відходи – перспектив-

ний відновлюваний природний матеріал для створення біоактивних композитів для знешкодження хімічного забруднення навколишнього середовища. Біосорбційні композити на основі рослинних сорбційних матеріалів та адаптованої природної асоціації мікроорганізмів-деструкторів є ефективними для знешкодження забруднення ґрунтів агрохімікатами. Проведення досліджень з розробки та застосування біосорбційного композиту з рослинної сировини для очищення ґрунту від накопичення гербіцидів є надзвичайно важливим.

Мета роботи. Дослідження фізико-хімічних, сорбційних та деструктивних (щодо гербіцидів) властивостей біологічно модифікованих сорбційних композитів на основі рослинних матеріалів для очищення ґрунтів від забруднення гербіцидами. Детоксикація накопичених гербіцидів у ґрунтах з метою їх відновлення забезпечує підвищення їх продуктивності та подальшого отримання високоякісної та екологічно безпечної аграрної продукції. Дослідження фізико-хімічних, сорбційних та детоксикаційних властивостей біологічно модифікованих сорбційних композитів на основі рослинної сировини для зниження токсичної дії гербіцидів у ґрунтах.

Матеріали та методи досліджень. Пошук оптимальних методів аналізу арохімікатів – одна з складних проблем аналітичної хімії. До зазначених методів відносять капілярну газову хроматографію (ГХ), високо-ефективну рідинну хроматографію (ВЕРХ). Ці методи мають високу роздільну здатність, високу чутливість. У дослідженні було застосовано метод високоефективної рідинної хроматографії як найбільш ефективний метод аналізу.

Біодеструктивну спроможність біосорбційного композиту з іммобілізованими мікроорганізмами-деструкторами гербіцидів контролювали за зниженням концентрації забруднюючої речовини (гербіцидів).

Виділення мікроорганізмів, потенційних деструкторів гербіцидів, здійснювали методом накопичувальних культур з ґрунтів (чорноземів), забруднених гербіцидами, із зразків, відібраних з поля діяльності агрофірм, де тривалий час застосовували гербіциди типу гліфосат – (N-(фосфonomетил)-глицин). В присутності забруднювача (гербіциду) у ґрунті шляхом вибіркового пригнічення виживають тільки найбільш стійкі до нього популяції. Експерименти проводили на мінеральному середовищі складу (г/л): K_2HPO_4 – 0,5; $NaNO_3$ – 0,5; $(NH_4)_2SO_4$ – 0,5; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0,2. Експериментально при видовому аналізі одержаної культури мікроорганізмів (МО) встановлено, що основними видами є *Sporocytophaga mυχococcoides*, *Sorangium cellulosum*, *Cellvibrio mixtus genomic*, *Trichoderma viride*, а також супутні їм гетеротрофні бактерії *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus megaterium*.

Виклад основного матеріалу. Дослідження процесу деструкції гербіцидів вивчали на модельованих зразках забрудненого ґрунту та у водному серед-

овищі при внесенні мікроорганізмів-деструкторів у вигляді культуральної рідини та іммобілізованих на сорбційному композиті. Підбір носія мікроорганізмів-деструкторів здійснювали згідно з вимогами: матеріал повинен мати поглинальну здатність до забруднювача (гербіциду), бути сприятливим середовищем для життєдіяльності мікроорганізмів та являти собою потенційне джерело органічного добрива для ґрунту. Носії на основі рослинної сировини мають спрямовану адсорбційну здатність до гербіциду та є біосумісними. Найвищу біодеструктивну активність щодо гербіцидів виявив рослинний композит на основі подрібненої соломи пшениці, торфу та бурякового жому. Кожна складова композиту має функцію: солома – активний поглинач органічного забруднювача, носій МОД та джерело ферменту – жовта лакказа, яка ініціює процес деструкції забруднювача; торф – консервант МОД та ксеропротектор, джерело органічного постачання; буряковий жом – джерело полісахаридів та ефективний утримувач вологи (1/5). Умови проведення дослідів – температура 30 °С, початкове рН = 8 та стартова кількість МОД – 10^7 кл/г, були однаковими.

Показники розмноження мікроорганізмів-деструкторів при розкладанні гербіциду для вільних бактеріальних культур та іммобілізованих на сорбенті були відмінними. Так, фаза адаптації та початку розмноження була більш тривалою при використанні при обробці забруднювача культуральною рідиною порівняно із іммобілізованою культурою на поверхні сорбенту. Така ж закономірність виявлена для експоненціальної фази росту, де має місце постійне ділення клітин, та для стаціонарної фази, для якої характерне зниження концентрації гербіциду, що споживають МО. В лабораторних умовах досліджено розкладання гербіциду під дією МОД у вільному стані (культуральна рідина) та іммобілізованих (сорбційний – композит). Модифікаційні зміни в структурі наявних у ґрунті гербіциду під дією мікроорганізмів-деструкторів оцінювали за показниками характерних ІЧ-спектрів. Якісні та кількісні зміни в ІЧ-спектрах свідчили про перебудову структури гербіциду. Дослідження зразків (етанольних екстрактів) методом високоефективної рідинної хроматографії виявили зниження початкової концентрації гербіциду в ґрунті до 30 % протягом 30 днів та повну перебудову структури забруднювача за більш тривалий час. Комплекс природних мікроорганізмів, виділених з ґрунтів забруднених гербіцидами, здатен ефективно знешкоджувати гербіциди різного хімічного складу. Деструктивну активність біосорбційного композиту та МОД у вільному стані щодо гербіцидів у водному та ґрунтовому середовищі (модельні системи) наведено у Табл. 1.

При оцінці екотоксикологічних показників ґрунтів щодо ефективності біосорбційного композиту відносно гербіцидів використано фітотестер (фіто-

Деструктивна активність біосорбційного композиту та мікроорганізмів-деструкторів у вільному стані щодо гербіцидів (модельні системи)

Показник Внесення через:	Вміст гербіцидів у воді мг/100 г води, у ґрунті мг/100 г ґрунту							
	Варіант внесення мікроорганізмів-деструкторів							
	МОД у вільному стані (культуральна рідина)				МОД, іммобілізовані на сорбційному матеріалі (композиті)			
	Ураган Форте		Раундап Макс		Ураган Форте		Раундап Макс	
	вода	ґрунт	вода	ґрунт	вода	ґрунт	вода	ґрунт
контроль	50,0	50,0	50,0	50	50	50	50	50
10 днів	49,1	44,2	47,1	48,3	42,1	38,2	34,1	31,2
30 днів	46,2	45,1	39,8	40,4	38,1	32,4	31,1	29,8
50 днів	42,3	44,1	37,8	39,2	37,1	31,2	29,8	27,2
80 днів	34,1	38,2	33,2	36,3	29,1	27,2	22,4	21,5
100 днів	31,6	37,3	31,8	34,8	12,1	10,6	9,8	3,2
120 днів	29,8	26,1	29,6	31,2	1,1	0,9	1,2	0,8

індикатор) рослин. Використання фітотестеру вівса переконливо доведено високу ефективність одержаного біосорбційного композиту для детоксикації надлишків гербіцидів у кореновому шарі ґрунту. Дослідження ілюструють токсичний вплив гербіцидів на плодоніжки та корінці рослин. У всіх випадках гербіциди негативно впливали на ріст насіння (пригніченість). Єдиним винятком була найнижча концентрація гербіциду, яка не мала серйозного впливу на зростання рослин. Тим не менш, розвиток коренів та пагонів, навіть після проростання, може зрештою зазнати токсичної дії гербіцидів. Знешкоджуюча дія біосорбційного композиту залежить від спо-

субу його внесення. Основну частину дози вносять у рядки. Доцільно здійснити обов'язковий рясний полив після внесення.

Головні висновки. Проведені дослідження підтверджують ефективність використання біосорбційних композитів деструктивного типу для очищення сільськогосподарських ґрунтів від надлишків агрохімікатів (гербіцидів). Отримані результати, з урахуванням дешевизни та доступності сировинної бази, дозволяють вирішувати практичні задачі, пов'язані з розробкою біоактивних сорбційних композитів та їх використання для очищення ґрунтів від накопичених агрохімікатів (гербіцидів).

Література

- Seeger M., Pieper D.H. 2010. Genetics of biphenyl biodegradation and co-metabolism of PCBs Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, P. 1179–1200.
- Gomes MP, da Silva Cruz FV, Bicalho EM, Borges FV, Fonseca MB, Juneau P, Garcia QS. 2017. Effects of glyphosate acid and the glyphosate-commercial formulation (Roundup) on *Dimorphandra wilsonii* seed germination: Interference of seed respiratory metabolism. *Environ Pollut. Jan*;220(Pt A):452–459. doi: 10.1016/j.envpol.2016.09.087. Epub 2016 Oct 7. PMID: 27726979
- Gomes MP, Rocha DC, Moreira de Brito JC, Tavares DS, Marques RZ, Soffiatti P, Sant'Anna-Santos BF. 2020. Emerging contaminants in water used for maize irrigation: Economic and food safety losses associated with ciprofloxacin and glyphosate. *Ecotoxicol Environ Saf.* Jun 15;196:110549. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110549. Epub 2020 Apr 3. PMID: 32251953
- Gomes MP, Richardi V, Bicalho E, Cristina D, Navarro da Silva MA, Soffiatti P. 2019. Effects of Ciprofloxacin and Roundup on seed germination and root development of maize. *Sci Total Environ.* 651. P. 2671–2678. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.365
- Yu QQ, Lu FF, Ma LY, Yang H, Song NH. 2021. Residues of reduced herbicides Terbutylazine, Ametryn, and Atrazine and toxicology to maize and the environment through salicylic acid. *ACS Omega.* 6(41). P. 27396–27404. doi:10.1021/acsomega.1c04315
- Wang, Z.-j.; Song, H.; Liu, H.; Ye, J. 2020. Coupling of Solar Energy and Thermal Energy for Carbon Dioxide Reduction: Status and Prospects. *Angew. Chem., Int. Ed.* 59 (21), 8016–8035, DOI: 10.1002/anie.201907443
- Gomes MP, Richardi V, Bicalho E, Cristina D, Navarro da Silva MA, Soffiatti P. 2019. Effects of Ciprofloxacin and Roundup on seed germination and root development of maize. *Sci Total Environ.* 651. P. 2671–2678. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.365
- Owen MDK. 2016. Diverse Approaches to herbicide-resistant weed management. *Weed Sci.* 64. P. 570–584. doi: 10.1614/4/ws-d-15-00117.1
- Zhou, L.; Martinez, J. M. P.; Finzel, J.; Zhang, C.; Swearer, D. F.; Tian, S.; Robotjazi, H.; Lou, M.; Dong, L.; Henderson, L.; Christopher, P.; Carter, E. A.; Nordlander, P.; Halas, N. J. 2020. Light-driven methane dry reforming with single atomic site antenna-reactor plasmonic photocatalysts. *Nat. Energy.* 5 (1), 61–70, DOI: 10.1038/s41560-019-0517-9
- Rocha DC, da Silva Rocha C, Tavares DS, de Moraes Calado SL, Gomes MP. 2021. Veterinary antibiotics and plant physiology: an overview. *Sci Total Environ* 767: 144902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144902>
- Moore, M. T.; Kröger, R. 2010. Effect of three insecticides and two herbicides on rice (*Oryza sativa*) seedling germination and growth. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 59, 574–581, DOI: 10.1007/s00244-010-9519-0

12. Lu, F. F.; Liu, J. T.; Zhang, N.; Chen, Z. J.; Yang, H. 2020. OsPAL as a key salicylic acid synthetic component is a critical factor involved in mediation of isoproturon degradation in a paddy crop. *J. Cleaner Prod.* 262, 121476, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121476
13. Chen, Z. J.; Lv, Y.; Zhai, X. Y.; Yang, H. 2021. Comprehensive analyses of degradative enzymes associated with mesotrione-degraded process in rice for declining environmental risks. *Sci. Total Environ.*, 758, 143618, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143618
14. Ma L. Y.; Zhang N.; Liu J. T.; Zhai X. Y.; Lv Y.; Lu F. F.; Yang H. 2019. Uptake of atrazine in a paddy crop activates an epigenetic mechanism for degrading the pesticide in plants and environment. *Environ. Int.*, 131, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105014>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 502.3

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.30>

МЕТОДИЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛІСОСМУГ В УМОВАХ ВПЛИВУ ВІЙСЬКОВИХ ДІЙ

Бабенко В.М., Босюк А.С., Крючкова В.В.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

vnniko19@gmail.com, bosuyk0614@ukr.net, kruchkova2680@gmail.com

Опрацьовано теоретичні та практичні засади моніторингу та оцінки стану рослин в лісосмугах. Визначення стану деревних рослин передбачає як оцінку їх здібності витримувати звичайне антропогенне навантаження так і збільшений вплив природних та надзвичайних умов. На життєвість (*vitality*) та життєздатність (*viability*) деревних рослин сьогодні впливає не тільки характерні природні фактори, а і військові дії. Оцінки стану деревних насаджень в лісосмугах рекомендовано проводити по оцінці життєвості рослин. Для зелених насаджень лісосмуг на антропогенних територіях сьогодні розроблена інтегральна оцінка що характеризує життєвий стан та фізіологію рослин, їх функціонування в складних умовах зміненого довкілля. Інтегральний підхід з різними вагомими коефіцієнтами надає можливість по-перше зробити оцінку та по-друге оперативно виконати необхідні кроки задля відновлення пошкоджених рослин в лісосмугах. Можливість своєчасно надати оцінку стану екосистеми є першим кроком для нормального існування та збереження деревних рослин в лісосмугах.

У роботі розглянуто та проаналізовано стан рослин в умовах як інтенсивних автотранспортних систем так і лісосмуги що поділяють сільськогосподарські поля природних і штучних екосистем передмістя Харкова та області за індивідуальними видовими параметрами: ріст, розвиток та можливість самовідновлення деревних рослин. Візуально стан життєдіяльності деревних рослин лісосмуг визначався за скороченими критеріями:

- рівень пошкодження деревних рослин лісосмуг;
- структура крони та величина молодих пагонів;
- стійкість до хвороб та механічних пошкоджень;
- здатність до самовідновлення після антропогенного впливу або прямих механічних пошкоджень від впливу повномасштабних військових дій.

За результатами оцінки стану деревних рослин в лісосмугах встановлено, що біля 50% літніх дерев не витримують антропогенного та механічного навантаження та всихають. Серед виду тополі пірамідальної тільки 20% рослин мають достатню життєвість та продовжують зростати. При такій тенденції спостерігається суттєвий розрив в лісосмугах серед рослин, окрім випадків природної заміни видів тополі на інвазійний вид клену ясенелистого. Аналіз видового насадження в Чугувському районі Харківської області свідчить про ефективність та перспективність в заміні деревних рослин виду тополі на клену гостролистого, звичайного або платаноподібного (*Acer platanoides* L.). Розроблено просту та зрозумілу шкалу оцінки стану лісосмуг на основі стану деревних рослин. *Ключові слова*: лісосмуги, екосистема, витривалість та життєвість деревних рослин, моніторинг стану довкілля.

Methodological and practical aspects of monitoring the condition of forest belts under the influence of military operations.
Babenko V., Bosyuk A., Kriuchkova V.

Theoretical and practical principles of monitoring and assessing the condition of plants in forest belts have been developed. Determining the condition of woody plants involves both assessing their ability to withstand normal anthropogenic loads and the increased impact of natural and emergency conditions. The vitality and viability of woody plants today are influenced not only by characteristic natural factors, but also by military actions. It is recommended to assess the condition of woody plants in forest belts based on the assessment of plant vitality. For green plantations in urbanized areas, an integrated assessment has been developed today that characterizes the vital state and physiology of plants, their vital activity in difficult conditions of the anthropogenic environment. An integrated approach with various significant coefficients makes it possible, firstly, to make an assessment and, secondly, to promptly take the necessary steps to restore damaged plants in forest belts. The ability to provide a timely assessment of the state of the ecosystem is the first step for the normal existence of woody plants in forest belts.

The work considers and analyzes the state of plants in conditions of both intensive motor transport systems and forest belts separating agricultural fields of natural and artificial ecosystems in the suburbs of Kharkiv and the region, focusing on individual species parameters: growth, development, and the possibility of self-renewal of woody plants. Visually, the state of vital activity of woody plants of forest belts was determined by abbreviated criteria:

- level of damage to woody plants of forest belts;
- crown structure and size of young shoots;
- resistance to diseases and mechanical damage;
- ability to self-renew after anthropogenic impact or direct mechanical damage of the effects of full-scale military operations.

According to the results of assessing the state of woody plants in forest belts, it was found that about 50% of old trees cannot withstand anthropogenic and mechanical loads and dry up. Among the species of pyramidal poplar, only 20% of plants have sufficient

vitality and continue to grow. With this trend, a significant gap exists in forest belts among plant species, except in cases where the natural replacement of poplar species by the invasive ash-leaved maple occurs. Analysis of species stands in the Chuguiv district of the Kharkiv region indicates the effectiveness and prospects of replacing woody plants of the poplar species with sharp-leaved, standard or sycamore maple (*Acer platanoides* L.). A simple and understandable scale for assessing the state of forest belts based on the state of woody plants has been developed. *Key words*: forest belts, ecosystem, endurance and vitality of woody plants, and environmental monitoring.

Постановка проблеми. Починаючи з весни 2022 року головною причиною деградації стану деревних насаджень лісосмуг в східних районах Харківської області, окрім погіршення якості природного довкілля, є вплив комплексу несприятливих військово-антропогенних чинників – фізична руйнація дерев та механічне порушення ґрунтів. До перших двох негативних факторів додається техногенне забруднення довкілля та виникаючі пожежі, яких тільки влітку 2025 року в Чугуївському районі було виявлено більше 20 випадків. Навіть всього вищеперахованого вже б вистачило для порушення екосистем лісосмуг, але на сьогодні до цього додається ще фактор збільшення сухості літніх місяців. Більша кількість деревних рослин не встигають адаптуватися до змін клімату та зростаючого антропогенного тиску, а чинник повномасштабних військових дій практично руйнує здатність зелених рослин виконувати їх природні екологічні функції. Метеорологічні умови Харківської області, для більшої кількості деревних видів, є задовільними, як за ґрунтово-кліматичними особливостями, так і за рівнем антропогенного навантаження. В Харківському та Чугуївському районах, де проводились дослідження, трансформація екосистем у насадженнях паркових зон відносно лісових масивів становить 65%, скверів і садів більше 90%, а в насадженнях лісосмуг всі 100%. До характерних негативних чинників, що впливають на стан лісосмуг, таких як недостатня вологість ґрунту, вплив автотранспортної мережі, хімічна забрудненість екосистем, особливо в поруч з навантаженими магістралями, додалися негативні фактори від військових дій що напряду впливають на стан деревних рослин.

На сьогодні існують «Санітарні правила в лісах України» [1], в яких прописано сукупність норм і заходів задля поліпшення санітарного стану лісів. Але ці правила практично сформовані для більших лісових об'єктів, а не для лісосмуг. Оцінка стану рослин лісосмуг не передбачає з'ясування причин зникнення або зниження стійкості деревних рослин, а заходи з покращення санітарного стану насаджень, такі як проста вирубка підліску не враховує появу інвазійних популяцій, які заміщують природні для України види рослин що використовувались традиційно для нашого регіону.

Актуальність дослідження. Повномасштабні військові дії, що розпочалися в 2022 році на сході України, тільки загострили проблеми лісосмуг, які хоча й не є повноцінними лісовими насадженнями, але гарно виконують свою роль в зниженні проце-

сів ерозії. Сьогодні виникла необхідність адекватної реакції з боку фахівців та наукової спільноти на таку проблему. Підвищення стійкості зелених насаджень лісосмуг приводить до зменшення витрат на їх створення та догляд не тільки в урбанізованих екосистемах, а й сільській місцевості, де їх важливість має не меншу вагу. Виявлення причин погіршення стану деревних рослин лісосмуг є першим кроком задля розробки оперативних заходів з покращення стану рослин та оптимізації умов довкілля для екологічного збалансованого сталого розвитку.

Оздоровлення природного та антропогенного життєвого простору людини в містах і сільській місцевості можливе лише за умов достатньої наявності деревних зелених насаджень що мають високу життєву витривалість, як до антропогенних факторів, так і до інвазійних видів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема дослідження відповідає «Цілі сталого розвитку: Україна» [2], де прописано, що 40% площі країни належать до території екологічної мережі. Необхідність забезпечення збереження, відновлення та сталого використання наземних і внутрішніх прісноводних екосистем, стале управління лісами, саме ці завдання закріплені у Національній доповіді по сталому управлінню лісами в Україні [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукових праць щодо дослідження стану деревних рослин в антропогенному середовищі в Україні недостатньо для проведення оцінки їх життєвого стану, а про насадження лісосмуг ще менше. Тому для аналізу досліджень і класифікації стану деревних насаджень обрано класичні наукові роботи на кшталт «Функціональна діагностика в дендроекології» [3] та «Життєвість деревних рослин (визначення, критерії та оцінка)» [4] в яких висвітлені концепції існування рослин в різних екосистемах. Дослідження біологічної адаптації деревних видів надають можливості створення нормальної життєдіяльності як для окремих дерев, так і для всієї екосистеми. В роботі «Життєвість (віталітет) як інтегральний показник стану популяції у рослин» [5] пропонується поняття «віталітет» для оцінки життєвого стану рослин, завдяки якому є можливість робити прогностичні оцінки деревних рослин як по шести бальній системі, так і по трьом категоріям, від високої до низької. В роботі [5] пропонується визначати стан рослин у вигляді інтегральної характеристики, як за індивідуальними так і за груповими параметрами рослин. На нашу думку найближче до вирішення проблеми моніторингу

деревних рослин в лісосмугах та лісових насадженнях підійшли в роботах «Інспекція дерев. Посібник для інспекторів стану дерев – базовий рівень» [6] та європейських стандартах (FER 2021) по діагностики та оцінці стану дерев.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Після аналізу публікацій стає зрозумілим, що відношення до лісосмуг в Україні має суто сторонній характер. З однієї сторони на їх стан до певного часу не звертають увагу, а з іншої сторони їх існування на сході країни є практично обов'язковим, тому що забезпечує зниження ерозійних процесів ґрунтів та підтримує біологічне різноманіття таких порівняно невеликих деревних об'єктів. Науково-практичний моніторинг стану лісосмуг, навіть просто в озелененні узбіччя автошляхів, є необхідною складовою для зменшення навантаження на довкілля, забезпечення зниження рівня шуму та вітрової складової ерозійних процесів. Чим вища життєздатність деревних рослин, тим ефективніше вони виконують свої функції. Метою роботи є встановлення періодичного моніторингу, розробка практичних методик визначення стану деревних рослин в лісосмугах задля створення якісних параметрів їх ефективного функціонування та рекомендацій по впровадженню місцевих видів рослин для таких насаджень.

Наукова новизна. Вперше, в період після повномасштабних військових дій на території Харківської області досліджено стан руйнації лісосмуг, проведено моніторингові дослідження якості ґрунтів лісових насаджень на трьох локаціях: в місті Харків (для порівняння) та Чугуївському районі. Розроблено методичний підхід до оцінки стану пошкодження деревних рослин у вигляді інтегральної характеристики, що відображає поточний стан лісосмуг та їх можливість до самовідновлення.

Методологічне або загальнонаукове значення. У даній роботі використовували метод натурного експерименту та ваговий метод з використанням електронних аналітичних ваг ТМ AXIS моделі ANZ160C.

Викладення основного матеріалу. Лісосмуги є важливим компонентом в екологічному сталому розвитку як урбанізованих територій автомагістралей, так і автошляхів в сільській місцевості, задля зменшення навантаження на навколишнє середовище й ерозійних процесів. Введення в роботу [5] поняття «віталітету» в нашому дослідженні розглядалось з позиції життєздатності вже сформованих деревних рослин задля збереження функціональності існуючої екосистеми лісосмуг. Життєвість дорослих деревних рослин, як інтегральна характеристика відображає стан рослин на основі індивідуальних параметрів росту, розвитку та можливої репродукції виду. Моніторингові оцінки, що проводяться на основі річних досліджень, хоча й вважаються короткотривалими, але є достатніми для отри-

мання результату змін з динамічною ознакою. На відміну від лісових масивів, лісосмуги, не є великою рослиною популяцією, в них життєвий цикл лімітується не лише антропогенними або екологічними чинниками, а й особистими можливостями кожної окремої деревної рослини.

Для лісосмуги візуально достатньо просто визначити життєздатність дорослих деревних рослин за наступними загальними критеріями:

- величина приросту і структура крони;
- загальний стан зелених частин рослини: розміри листя, колір та наявність хвороб;
- репродуктивна здатність: молоді пагони та наявність насіння;
- стійкість до забруднення ґрунтів і хвороб;
- здатність до самовідновлення після механічних пошкоджень внаслідок військових дій або незвичайних природних умов.

Дослідження на місцевості корелюються з літературними джерелами по наступним видам молодих рослин лісосмуг: тополя та клен. Практично на другий рік після втрати дорослих дерев починає зростати підлісок. Спочатку досить хаотично, а через 2-3 роки проходить природний відбір після якого перемагають більш здорові рослини (рис. 1).

Для дорослих рослин, віком від 1 до 4 років віталітет визначається по наступній шкалі, де 1 – це найкращий стан, а 5 – повна втрата рослини:

1. Рослини у активній фазі росту, пагони ростуть динамічно і рівномірно, утворюючи довгі стебла яким притаманний дворазовий, за розмірами, річний приріст. Листя, в своїй більшості велике, густе і рівномірно по усім молодим пагонам.
2. Сповільнений ріст молодих пагонів. Бічні гілки утворюють короткі пагони. З нижньої частини пагонів втрачається приблизно 1/4 об'єму листового покриву з причин конкуренції або хвороб. За розмірами листя стає меншим.
3. Приріст рослин у висоту мінімальний. Втрата 50% об'єму листя, крона дерева виглядає розрідженою.
4. Спостерігається зникнення листя зверху крони дерева та всихання скелетних і бічних гілок. Поява нових пагонів відсутня. Втрата 75% об'єму листя, зменшення розмірів листової пластинки.
5. Дерево всихає без ознак регенерації.

Деревні рослини в досліджуваних екосистемах знаходились у зрілому репродуктивному віці. Період зрілості у деревних видів різний, а його настання залежить від місцевих, метеорологічних умов довкілля та генетичних чинників. Несприятливі погодні умови, механічні руйнації, додаткове забруднення ґрунтів важкими металами та хімічними сполуками змінюють настання репродуктивного віку. Такі фактори, для швидкозростаючих видів клену, прискорюють плодоносіння раніше, ніж для деревних рослин, що зростають повільно. Для малих популяцій, якими є лісосмуги і які сформовані задля



Рис. 1. Кількість втрачених дорослих дерев складає 65-70%, їх місце займає підлісок переважно з клену та вільхи, Чугуївський район, Харківська область

спеціалізованої потреби, інтегральна ознака стану рослин є головним параметром, що слугує важливим показником для визначення перспектив розвитку. Встановлення можливостей тримати високі навантаження є одним з головних чинників для такого виду екосистем. Проведення дослідження змін в динаміці лежить в основі розуміння складних процесів таких специфічних екосистем якими є лісосмуги, де присутні фактори як природного так і штучного відбору. Головними параметрами для встановлення життєвості в лісосмугах є практично такі ж як і в лісових масивах (рис. 2): обсяг дерев, вікова складова, статеві структура, загальна чисельність на одиницю площі, здатність до самовідновлення та розмноження у вигляді вегетації або насіння.

За результатами оцінки життєвого стану хвойних деревних рослин, місто Харків 522 мікрорайон, який створено на намивних пісках встановлено, що 95% дерев загинуло або знаходились в аварійному стані й були зрізані, 2% дерев мають середній рівень пошкоджень і тільки 3% рослин залишилися в задовільному стані. І хоча це не є класичною лісосмугою, але вказує на те що найбільший вплив серед деревних рослин зазнали хвойні дерева. На цієї ж локації (рис. 2), найкраще себе почуває види акації білої та клену, молоді пагони яких демонструють практично 100% витривалість як природним, так і антропогенним умовам. Подібні, у відсотках, тенденції спостерігаються і на сільській локації, розташованій в Чугуївському районі, за відмінністю, що головний вид деревної рослинності була вільха, а молодим підліском є клен. За результатами моніторингового дослідження візуально підтверджена оцінка втрати до 50% дорослих дерев, особливо

в тих лісосмугах, що потрапили під вплив військових дій. Всі дерева мають певні ушкодження на яких через 1-2 роки розповсюджуються процеси гноїння, тому серед них залишаються 3-5% дерев першої категорії життєвості.

Аналіз літературних джерел, створення та існування хвойного масиву дерев, що розмежовує автотрасу, підтвердив, що саме каталізатором руйнації екосистеми є вплив військових дій та їх наслідків у вигляді пожежі. Так само виглядає ситуація з локацією за межами міста, але там додається фактор спотворення ґрунтів окопами, вирвами та пересуванням в лісосмугах важкої гусеничної техніки. Окремо треба підкреслити той факт що на заміну природним деревним видам приходить інвазійний різновид клену ясенелистого, який в таких умовах зменшенні конкуренції дуже швидко, протягом 3-5 років намагається зайняти спустошену біологічну ділянку.

Висновки. В умовах сільської місцевості визначення стану деревної рослинності доцільніше проводити індивідуально для кожної лісосмуги з відрізком через 250-300 метрів, тому що наслідки пошкоджень мають переривчастий характер. Життєвість рослин залежить від вище перерахованих факторів, особливо механічних пошкоджень від усіх видів стрілецької зброї та розташування самої локації. Життєвий стан деревних рослин визначався візуально за шкалою з п'яти градацій яка підходить як для лісосмуг біля автошляхів, сільської місцевості, так і для невеликих 1-2 гектара лісових об'єктів на периферії міста.

Від стану рослин в лісосмугах залежить оцінка їх можливості виконувати головні функції: захисні, екологічні, створення середовища для біологічних видів та просто естетичні властивості. Прогнозування,



Рис. 2. Хвойний лісовий масив на території міста Харків що зазнав комплексний вплив пошкодження від обстрілів, пожежі та шкідників

планування та корегування стану дерев в лісосмугах, особливо порід вікових дерев доцільно здійснювати за п'ятибальною оцінкою їх життєздатності, так як сама життєздатність лісосмуги чи невеликого лісового масиву дерев, є оцінкою життєвості організмів. Для визначення стану лісосмуг мають значення наступні характеристики: лінійні розміри, вікова та статева (для окремих видів) структури, чисельність на одиницю площини (що зазвичай більша ніж для лісового масиву) і останнє – це здатність до розмноження вегетативним методом або за рахунок насіння.

Моніторинг стану рослин в екосистемах лісосмуг з одного боку свідчить про перспективність природного відновлення, а з іншого ракурсу є заростання більшого відсотка території інвазійним видом клену ясенелистого. Досвід створення лісосмуг в Україні свідчить про можливість брати під контроль процеси ерозії, коли найкращі результати дають поєднанням засадження ярів чагарником, а кордоном стають дерева лісосмуг або автошляхи. Також кращим варіантом є природне заростання узбіччя доріг швидкозростаючими деревними рослинами, на кшталт клену, верби та вільхи, які утворюють прості біосистеми та виконують свою екологічною функцією.

Головним чином цьому сприяє розмноження через велику кількість насіння таких місцевих видів.

Потужна поверхнева коренева система, особливо к клену, гарантує неможливість просування інвазійних трав'яних рослин по типу амброзії, що й спостерігалось в сільській локації Чугуївського району Харківської області. Зміцнення та відновлення стану поверхневих шарів ґрунту є завершальним позитивним фактором для відновлення та оновлення стану лісосмуг, як в сільській місцевості так і в антропогенному ландшафті.

Перспективи використання результатів дослідження. Реальна оцінка стану рослин лісосмуг дозволяє при мінімальних витратах покращити існуюче екологічне положення, що в свою чергу, позитивно впливає як на локальне так і на регіональне навколишнє середовище, покращує естетичний вигляд довкілля. Лісосмуги є невід'ємною частиною сталого розвитку не тільки великих міст та передмістя, а й прикрасою сільської місцевості, що загалом впливає на оздоровлення людини, повноцінне існування якої фізично неможливе без достатньої кількості дерев, лісосмуг та більших за площею лісових насаджень.

Література

1. Санітарні правила в лісах України : Постанова Кабінету Міністрів України від 26 жовт. 2016 р. № 756. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/756-2016-%D0%BF#n9> (дата звернення: 20.09.2025).
2. Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» / М-во екон. розвитку і торгівлі України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainu.pdf> (дата звернення: 20.09.2025).
3. Гнатів П. С. Функціональна діагностика в дендроекології : монографія. Львів: В-во Камула, 2014. 336 с.
4. Горелов О. М., Горелов О. О. Життєвість деревних рослин (визначення, критерії та оцінка). *Вісник Львівського університету. Сер. біологічна*. 2017. Вип. 76. С. 105–111.

5. Кияк В. Г. Життєвість (віталітет) як інтегральний показник стану популяції у рослин. *Біологічні Студії / Studia Biologica*. 2014. Том 8, № 3–4 С. 273–284.
6. Інспекція дерев. Посібник для інспекторів стану дерев – базовий рівень / К. Віткось-Гнах та ін. Чернівці, 2023. 224 с.
7. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / Л. М. Шутенко та ін.; за ред. Л. М. Шутенка. Харків, 2017. 563 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ ВОДНИХ РЕСУРСІВ В УМОВАХ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Івашченко Т.Г., Печений В.Л., Яковлев І.О.

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

Розглянуті методичні особливості моніторингу якості водних ресурсів в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Актуальність теми обумовлена критичним станом водних екосистем внаслідок промислової діяльності, урбанізації та військових дій – факторів, що призвели до комплексного багатоконпонентного забруднення поверхневих вод. Сучасний стан водних ресурсів України, де зруйновано понад 500 об'єктів водогосподарської інфраструктури, не відповідають нормативним вимогам.

Критичні прогалини в існуючих системах моніторингу засвідчують недостатню інтеграцію методів біоіндикації з технічними системами спостереження, відсутність методологій для оцінки синергетичних ефектів багаторазового забруднення та неадекватність систем раннього попередження в умовах високого антропогенного навантаження.

Запропонована гібридна структура нагляду на основі автосенсорів гідрохімічних ознак, датчиків життя від знакових малих істот та установок перевірки цифрового зображення для судження щодо стану водного життя. Розроблено спосіб означення стану якості води, враховуючи суміш багатьох видів бруду на основі теорії рівності шкідливих речовин, що дає змогу підрахувати ефективність об'єднання й боротьби брудних елементів. Методика оцінки якості води з урахуванням взаємодії різних типів забруднюючих речовин на основі теорії токсичних еквівалентів дозволяє кількісно оцінити синергетичну та антагоністичну дію забруднюючих речовин. Представлено систему раннього попередження з використанням мережі автономних станцій моніторингу, алгоритмів машинного навчання для виявлення аномалій та моделей прогнозування поширення забруднення. Система адаптивного моніторингу автоматично збільшує частоту спостережень та виявлення відхилень від нормативних значень, а штучні нейронні мережі ідентифікують ранні ознаки кризових ситуацій.

Запропоновані рішення забезпечують економічну ефективність за рахунок скорочення витрат на реагування на надзвичайні ситуації та відновлення екосистеми шляхом своєчасного виявлення загроз для навколишнього середовища. *Ключові слова:* водні ресурси, екологічна катастрофа, екологічний моніторинг, екологічна безпека.

Methodological aspects of water resource quality monitoring under anthropogenic pressure. Ivashchenko T., Pechenyi V., Yakovlev I.

The article is devoted to the consideration of methodological aspects of monitoring the quality of water resources in conditions of growing anthropogenic load. Its relevance is due to the critical state of aquatic ecosystems as a result of industrial activity, urbanization, and military actions – factors that have led to complex multicomponent pollution of surface waters. The current state of water resources in Ukraine, where more than 500 water management infrastructure facilities have been destroyed, does not meet regulatory requirements. Critical gaps in existing monitoring systems include insufficient integration of bioindication methods with technical observation systems, lack of methodologies for assessing the synergistic effects of multiple pollution, and inadequacy of early warning systems in conditions of high anthropogenic pressure. A hybrid surveillance structure is planned, based on auto-sensors of hydrochemical characteristics, life sensors from iconic small creatures, and digital image verification installations to assess the state of aquatic life. A method has been developed to assess water quality, taking into account a mixture of many types of pollution based on the theory of equal harmful substances. This allows us to calculate the effectiveness of combining and combating dirty elements. The method of assessing water quality, taking into account the interaction of different types of pollutants based on the theory of toxic equivalents, allows us to quantitatively assess the synergistic and antagonistic effects of pollutants. An early warning system is presented using a network of autonomous monitoring stations, machine learning algorithms for anomaly detection, and pollution spread prediction models. The adaptive monitoring system automatically increases the frequency of observations when deviations from normative values are detected, and artificial neural networks identify early signs of crisis situations. The proposed solutions ensure economic efficiency by reducing the cost of responding to emergencies and restoring the ecosystem through the timely detection of threats to the environment. *Key words:* water resources, ecological disaster, ecological monitoring, ecological safety.

Постановка проблеми. Погіршення якості води внаслідок активізації антропогенної діяльності є однією з головних екологічних проблем сучасності. Як повідомляє програма моніторингу Цілей сталого розвитку ООН, у 2024 році 2,2 мільярда людей не матимуть доступу до безпечного водопостачання, а 3,4 мільярда людей не матимуть безпечно керованої санітарії [1, 2]. За даними UN-Water, у 2022 році 42% побутових стічних вод не очища-

лися достатньою мірою перед скиданням, що становило приблизно 113 мільярдів м³ неочищених або недостатньо очищених побутових стічних вод [3]. Світові дослідження свідчать, що 48% усіх стічних вод скидається в поверхневі водойми без будь-якої очистки, що критично порушує екологічний баланс гідроекосистем [4].

Водні ресурси України характеризуються особливо високим рівнем антропогенного наванта-

ження. Дані Державного агентства водних ресурсів України свідчать, що за основними показниками якості води у більшості водних об'єктів не відповідає нормативним вимогам. Ситуація ускладнюється наслідками повномасштабної військової агресії РФ проти України, що триває майже шість років, – російські війська знищили понад 500 об'єктів водної інфраструктури та пошкоджено 39 700 кілометрів водних мереж, що призвело до порушення функціонування систем екологічного моніторингу [5, 6].

Актуальність дослідження. Сучасний стан водного господарства окреслений істотним погіршенням якості водних ресурсів як наслідок посилення антропогенного навантаження та військових дій. Моніторинг, пов'язаний з ефективним контролем якості води, є найважливішим з точки зору екологічної безпеки та сталого розвитку. Актуальність дослідження, спрямованого на розробку методів моніторингу якості води в умовах антропогенного навантаження, зумовлена комплексом взаємопов'язаних факторів наукової, практичної та соціальної сфер.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на вирішення науково-практичних завдань в галузі екологічного моніторингу водних ресурсів. З точки зору науки, це методологічна проблема, яка не має достатньо розроблених теоретичних засад комплексного моніторингу якості води в умовах наявності багатьох джерел антропогенного впливу. Зокрема, необхідно систематизувати існуючі підходи до контролю якості води, визначити прогалини в традиційних методах спостереження та сформулювати концептуальні принципи інтеграції методів біоіндикації з дистанційними технологіями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сфера моніторингу якості води наразі характеризується активним розвитком інноваційних технологічних рішень і методологічних підходів. Дослідження описують сплеск у застосуванні технологій машинного навчання та IoT для досягнення кінцевої мети – моніторингу якості води. Вчені, намагаючись об'єднати різні системи датчиків, з'ясували, що 30,9 мільярдів підключених пристроїв до 2025 року у всьому світі створює нові можливості для розвитку систем моніторингу якості води. Науковці наголошують на подальшій оцінці існуючих технологічних рішень щодо практичних проблем, що перешкоджають масштабуванню та розробці автоматизованих систем контролю [7, 8].

Останні дослідження підкреслюють складність створення узгоджених баз даних якості поверхневих вод на глобальному рівні. Вчені зібрали найбільшу базу даних за 1940–2023 роки, яка містить 2,82 мільйона вимірювань восьми параметрів якості води. Автори пропонують уніфікувати підходи до збору та опрацювання гідроекологічних даних. Такі дослідження порівнюють ефективність традицій-

них і сучасних методів моніторингу за різних умов їх застосування. Автори обґрунтовують переваги систем IoT у забезпеченні виявлення забруднень у реальному часі порівняно з лабораторними методами [9, 10].

Наукові роботи засвідчують перспективність впровадження пристроїв IoT з постійним моніторингом віддалених локацій. Дослідники визначають передові технології дистанційного зондування як один із перспективних напрямків у розвитку систем контролю навколишнього середовища. Автори докладно зупиняються на проблемах забезпечення точності вимірювань недорогих датчиків і акцентують увагу на проблемах надійності обладнання в різних умовах експлуатації. Вчені обґрунтовують свою аргументацію щодо стандартизації методів калібрування та протоколів тестування, тим самим обґрунтовуючи уніфікований підхід до протоколів тестування [11, 12].

Автори припускають, що можна передбачити зміни якості води з високим ступенем точності за допомогою аналізу часових рядів на основі нейронної мережі. Вчені підтверджують ефективність застосування інтеграції різних факторів навколишнього середовища в моделі машинного навчання та підкреслюють перспективи застосування ШІ для раннього виявлення забруднення [13, 14].

Глобальна ситуація з якістю водних ресурсів погіршується, експерти вказали, що незадовільна якість водних об'єктів зменшилася з 57% у 2017 році до 56% у 2023 році. Таким чином, це дослідження виступає за посилення міжнародної координації зусиль щодо моніторингу водних ресурсів [15].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значний прогрес, аналіз літератури виявляє кілька критичних прогалин: інтеграція підходів біоіндикації з технічними системами моніторингу не була запроваджена належним чином; комплексні методології для оцінки синергетичних ефектів багаторазового забруднення відсутні; відсутність ефективної системи раннього попередження в умовах, діагностованих як високе антропогенне навантаження.

Викладення основного матеріалу. На основі виявлених критичних прогалин у сучасній системі моніторингу якості води представлено комплексний підхід до вирішення трьох ключових проблем: інтеграція методів біоіндикації з технічними системами, розробка методології оцінки синергетичних ефектів множинного забруднення та створення ефективних систем раннього попередження.

Традиційні системи моніторингу якості води базуються переважно на фізико-хімічних показниках, тому не дають повної оцінки екологічного стану вод. Методи біоіндикації дозволяють визначити комплексний вплив забруднення на біоту; однак широке застосування таких методів стримується

труднощами стандартизації та великою суб'єктивністю в інтерпретації результатів.

Запропонований підхід передбачає створення гібридної системи моніторингу, що поєднує:

– автоматизовані датчики основних гідрохімічних параметрів (рН, розчинений кисень, електропровідність, каламутність);

– біосенсори на основі мікроорганізмів-індикаторів для виявлення токсичних речовин;

– цифрові системи аналізу зображень для оцінки стану макрофітів та фітопланктону.

Головною перевагою такої інтеграції є можливість отримання в режимі реального часу цілісної картини екологічного стану водойми. Технічні датчики забезпечують постійний контроль основних параметрів, а сигнали біоіндикації виконують два завдання: по-перше, вони сигналізують про наявність певних токсикантів; по-друге, свідчать про порушення функцій екосистеми.

Оскільки сучасні водні екосистеми стикаються з множинними джерелами забруднення, що призводить до складного злиття різних забруднюючих речовин, традиційні методи оцінки якості води, засновані на аналізі окремих компонентів, не враховують синергізм і антагонізм між взаємодіючими забруднювачами. Пропонується методика оцінки якості води, яка враховує взаємодію між різними типами забруднюючих речовин. Ця методика включає в себе:

– математичні моделі ефектів взаємодії забруднюючих речовин на основі теорії токсичних еквівалентів;

– індекси комплексного забруднення, що відображають як адитивні, так і неадитивні ефекти;

– алгоритми ідентифікації критичних комбінацій забруднюючих речовин;

– системи прогнозування екологічного ризику від багаторазового забруднення.

Методологія спирається на концепцію, відому як токсичне навантаження, яка дозволяє кількісно оцінити загальний вплив різних типів забруднюючих речовин, враховуючи їх взаємний вплив. Для цього на основі біотестування та математичного моделювання виводяться коефіцієнти синергізму/антагонізму.

Своєчасне виявлення ризиків та своєчасне реагування на критичні ситуації є факторами якісного

управління водними ресурсами. Пропонується система раннього попередження, яка включатиме:

– мережу автономних станцій моніторингу з бездротовою передачею даних;

– алгоритми машинного навчання для виявлення аномальних змін параметрів води;

– моделі прогнозування поширення забруднення з урахуванням гідродинамічних характеристик.

Система адаптивного моніторингу працюватиме за принципом автоматичного збільшення частоти спостережень при виявленні відхилення від нормативних значень для детального відстеження динаміки процесів. Штучні нейронні мережі використовуватимуться для розпізнавання складних закономірностей у зміні якості води, що є передвісниками виникнення кризової ситуації.

Запропонований економічно ефективним, оскільки дозволить скоротити витрати на реагування на надзвичайні ситуації та відновлення екосистем за рахунок своєчасного виявлення та попередження екологічних інцидентів.

Висновки. Проведені дослідження дозволили сформулювати загальний підхід до розв'язання існуючих проблем моніторингу якості водних ресурсів в умовах антропогенного навантаження. Обґрунтовано необхідність переходу від традиційних систем моніторингу виключно за фізико-хімічними показниками до комплексних підходів, що поєднують технічні засоби з методами біоіндикації. Гібридна система моніторингу дає змогу отримати повну картину екологічного стану водойми в режимі реального часу. Методика оцінки синергетичних ефектів множинного забруднення на основі теорії токсичних еквівалентів, яка, окрім адитивної, має також неадитивні взаємодії між забруднювачами. Система раннього попередження з використанням технологій машинного навчання та IoT здатна забезпечувати своєчасне виявлення аномальних змін у параметрах водного середовища, а також прогнозувати поширення забруднення з урахуванням гідродинамічних характеристик водойм.

Сфери подальших досліджень передбачають стандартизацію процедур калібрування біосенсорів та розробку інтегрованих баз даних для обробки різних типів інформації.

Література

1. UN Statistics Division. SDG Report 2025 Goal 6. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2025/Goal-06/> (дата звернення: 11.08.2025).
2. UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2024. URL: <https://data.unicef.org/resources/jmp-report-2025/> (дата звернення: 11.08.2025).
3. UN-Water. Progress on Wastewater Treatment – 2024 Update. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2024-update> (дата звернення: 11.08.2025).
4. Jones, N.E., Meijer, D., Meijer, L.M. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. *Earth System Science Data*, 2021, № 13, P. 237–254.
5. UNICEF. The water we leave behind: securing Ukraine's Climate resilient future. URL: <https://www.unicef.org/ukraine/en/blog/water-we-leave-behind-securing-ukraines-climate-resilient-future> (дата звернення: 30.08.2025).

6. EU4Environment (2024). The toll of two years of war on water: Damage and needs assessment in Ukraine's water sector. URL: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/765769/EPRS_STU\(2025\)765769_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2025/765769/EPRS_STU(2025)765769_EN.pdf) (дата звернення: 30.08.2025).
7. Essamlali I, Nhaila H, El Khaili M. Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*. 2024. № 10(6). e27920. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e27920.
8. Miller M, Kisiel A, Cembrowska-Lech D, Durlak I, Miller T. IoT in Water Quality Monitoring-Are We Really Here? *Sensors (Basel)*. 2023. № 23(2). 960. doi: 10.3390/s23020960.
9. Karim, M.R., Syeed, M.M.M., Rahman, A. A Comprehensive Dataset of Surface Water Quality Spanning 1940-2023 for Empirical and ML Adopted Research. *Sci Data*. 2025, № 12, 391. DOI: 10.1038/s41597-025-04715-4
10. Zainurin SN, Wan Ismail WZ, Mahamud SNI, Ismail I, Jamaludin J, Ariffin KNZ, Wan Ahmad Kamil WM. Advancements in Monitoring Water Quality Based on Various Sensing Methods: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022. № 19(21):14080. DOI: 10.3390/ijerph192114080.
11. Jaywant SA, Arif KM. Remote Sensing Techniques for Water Quality Monitoring: A Review. *Sensors (Basel)*. 2024. № 24(24):8041. DOI: 10.3390/s24248041.
12. de Camargo ET, Spanhol FA, Slongo JS, da Silva MVR, Pazinato J, de Lima Lobo AV, Coutinho FR, Pfrimer FWD, Lindino CA, Oyamada MS, Martins LD. Low-Cost Water Quality Sensors for IoT: A Systematic Review. *Sensors (Basel)*. 2023. № 23(9):4424. DOI: 10.3390/s23094424.
13. Popescu S. M., Mansoor S., Wani O. A., Kumar S. S., Sharma V., Sharma A., Arya V. M., Kirkham M. B., Hou D., Bolan N., Chung Y. S. Artificial intelligence and IoT driven technologies for environmental pollution monitoring and management. *Frontiers in Environmental Science*. 2024. № 12. 1336088. DOI: 10.3389/fenvs.2024.1336088.
14. Izah Sylvester Chibueze, Ogwu Matthew Chidozie. Modeling solutions for microbial water contamination in the global south for public health protection. *Frontiers in Microbiology*. 2025. № 16. DOI:10.3389/fmicb.2025.1504829.
15. Progress on Ambient Water Quality – 2024 Update. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-ambient-water-quality-2024-update> (дата звернення: 08.09.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ТУРИСТИЧНІ КАРТИ ЯК ЗАСІБ ПРОМОЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ТУРИСТИЧНИХ РЕСУРСІВ УКРАЇНИ

Давидова І.В.¹, Панасюк А.В.¹, Демчук Л.І.¹, Рекун І.А.¹, Корбут М.Б.²

¹Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

²Національний університет «Львівська політехніка»
вул. Митрополита Андрея, 5, 79017, м. Львів
div@ztu.edu.ua, kgt_kmb@ztu.edu.ua

У статті розглянуто роль туристичних карт як ефективного засобу промоції локальних туристичних ресурсів України в умовах децентралізації та зростання внутрішнього туризму. Підкреслено актуальність дослідження, зумовлену необхідністю підвищення туристичної видимості малих населених пунктів, які володіють значним, але недостатньо реалізованим культурним і природним потенціалом. Метою роботи є обґрунтування картографічних підходів до формування туристичних маршрутів і створення карт як інструментів популяризації локальних дестинацій. Методологічну основу становлять поєднання польових досліджень, оцінювання туристичної привабливості територій за бальною системою, а також соціологічне опитування відвідувачів. На прикладі малих міст Житомирської області (Бердичів, Малин, Олевськ, Коростишів) здійснено комплексну оцінку природних, культурно-історичних, інфраструктурних і інформаційних чинників розвитку туризму. За результатами аналізу визначено Коростишів як пілотну локацію для апробації туристичних карт. У межах дослідження створено пішохідний маршрут «Історичний Коростишів» протяжністю 2,6 км, який об'єднує ключові культурні та рекреаційні об'єкти міста. Проведене тестування впливу картографічного продукту засвідчило зростання кількості відвідувань основних туристичних об'єктів на 44 %, підвищення рівня задоволеності туристів і збільшення частки позитивних відгуків. Отримані результати підтверджують, що використання якісних друкованих і цифрових карт сприяє покращенню орієнтації відвідувачів, стимулює повторні візити та формує позитивний імідж громади. Практичне значення дослідження полягає у розробленні моделі доступного картографічного забезпечення для малих міст, яку можна масштабувати на інші регіони України. Туристичні карти рекомендовано розглядати не лише як навігаційний інструмент, а як важливий елемент територіального маркетингу та сталого розвитку локального туризму. *Ключові слова:* туристичні карти, картографія, локальний туризм, маршрути, промоція, малі населені пункти.

Tourist maps as a means of promoting local tourist resources of Ukraine. Davydova I., Panasiuk A., Demchuk L., Rekun I., Korbut M.

The article examines the role of tourist maps as an effective tool for promoting local tourism resources in Ukraine under the conditions of decentralization and the growing demand for domestic travel. The relevance of the research is determined by the need to increase the visibility of small settlements that possess significant, yet underutilized, cultural and natural potential. The study aims to substantiate cartographic approaches to the development of tourist routes and demonstrate the use of maps as instruments for the promotion of local destinations. The methodological framework combines field research, assessment of tourism attractiveness based on a scoring system, and sociological surveys of visitors. Using small towns of the Zhytomyr region (Berdychiv, Malyn, Olevska, and Korostyshiv) as case studies, a comprehensive evaluation of natural, cultural-historical, infrastructural, and informational factors of tourism development was carried out. Based on the analysis, Korostyshiv was identified as a pilot location for testing the promotional effect of tourist maps. A pedestrian route «Historical Korostyshiv» (2.6 km long) was developed, combining the city's key cultural and recreational sites. The testing of the cartographic product showed a 44 % increase in the number of visitors to the main tourist attractions, a higher level of visitor satisfaction, and a larger share of positive feedback. These results confirm that using high-quality printed and digital maps improves visitor orientation, encourages repeated visits, and enhances the image of the local community. The study's practical significance lies in developing a replicable model of accessible cartographic support for small towns, which can be scaled to other regions of Ukraine. Tourist maps should be regarded as navigation tools and important elements of territorial marketing and sustainable local tourism development. *Key words:* tourist maps, cartography, local tourism, routes, promotion, small settlements.

Постановка проблеми. У сучасних умовах децентралізації та регіонального розвитку дедалі більшої уваги набуває проблема підвищення туристичної привабливості малих населених пунктів України. Саме локальні громади володіють значним, проте часто недооціненим потенціалом у сфері культурного, природного й етнографічного туризму. Їхні ресурси – архітектурні пам'ятки, традиційні ремесла,

мальовничі ландшафти, гастрономічна культура – здатні не лише зберігати національну ідентичність, але й створювати додану вартість через розвиток локальної туристичної інфраструктури.

Після 2022 року в Україні спостерігається суттєве зростання внутрішнього туризму, зумовлене низкою факторів, серед яких – обмеження виїзного туризму через воєнну діяльність, підвищений інтерес грома-

дзя до вивчення власної країни, а також прагнення підтримати національну економіку через споживання локальних туристичних продуктів. Зміна туристичних потоків сприяла переорієнтації попиту з великих туристичних центрів на відносно безпечніші, маловідомі, але перспективні регіони, що відкриває нові можливості для розвитку внутрішнього локального туризму.

Однак попри зростання інтересу, багато малих міст і сіл залишаються слабо представленими у туристичному інформаційному просторі. Їхні ресурси часто не мають належного опису, картографічного відображення та зручних туристичних маршрутів. Бракує інтегрованих інформаційних рішень, які б дозволяли поєднувати культурно-історичні, природні й сервісні об'єкти в єдину туристичну мережу. Це знижує видимість таких територій, ускладнює планування подорожей і стримує розвиток місцевого підприємництва.

Одним із ефективних засобів популяризації мало відомих територій є створення туристичних карт і маршрутів, які виступають не лише навігаційним інструментом, але й важливим елементом маркетингу територій. Туристична карта здатна забезпечити швидкий доступ до структурованої інформації про об'єкти, сервіси та маршрути, стимулюючи прийняття рішення про відвідування певного населеного пункту.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розроблення ефективних картографічних інструментів для промоції локальних туристичних ресурсів, що сприятиме не лише інформуванню потенційних відвідувачів, а й стимулюванню розвитку місцевого бізнесу, підвищенню зайнятості населення та формуванню позитивного іміджу регіонів.

Мета статті – дослідити роль туристичних карт як засобу промоції локальних туристичних ресурсів України та визначити принципи їхнього створення для підвищення туристичної привабливості малих населених пунктів у контексті сучасних соціально-економічних умов.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження узгоджується з пріоритетними напрямками державної політики у сфері регіонального розвитку, просторового планування та туризму, визначеними Стратегією розвитку туризму та курортів України до 2030 року. Робота спрямована на вирішення науково-практичного завдання підвищення туристичної привабливості малих територіальних громад шляхом удосконалення картографічного забезпечення та використання туристичних карт як інструменту промоції. Результати мають прикладне значення для органів місцевого самоврядування, освітніх і туристичних установ, оскільки можуть бути використані при плануванні маршрутів, брендингу територій і розвитку локальної туристичної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика картографічного забезпечення туризму привертає увагу як українських, так і зарубіжних дослідників. У науковій літературі туристичні карти розглядаються не лише як інструмент орієнтації, але й як засіб пізнання, промоції та маркетингу територій.

Дизайн карти та спосіб відображення об'єктів формують перше візуальне враження про дестинацію і впливають на уявлення про її «характер» і цінності. Останні дослідження показують, що використання локальної історії й візуальних сюжетів у картографії підсилює сприйняття культурної автентичності й може працювати як елемент територіального брендингу [1]. Проте важливо підкреслити, що естетична привабливість карти не є автоматичною гарантією зростання потоку відвідувачів: маркетинговий ефект карт залежить від контекстуальної інтеграції – тобто від каналів розповсюдження, довіри до джерела інформації й загальної репутації дестинації [2].

Частина досліджень фокусується на використанні цифрових даних – від геотегованих фото до масивів відгуків – які дозволяють оперативно ідентифікувати популярні локації та будувати динамічні карти [3, 4]. Ці підходи відкривають можливості для оновлення контенту карт у реальному часі і підстроювання промо-активностей під актуальний попит. Водночас критичні роботи звертають увагу на селективність VGI-даних: геотеги відображають активність лише певних груп користувачів, що може бути упереджено щодо вікових, соціально-економічних чи просторових категорій [5, 6]. Таким чином, для локальних громад картографічні рішення, побудовані виключно на VGI, ризикують ігнорувати менш цифрово-активні аудиторії, які водночас можуть становити значну частку внутрішніх туристів у певних регіонах. Для малих українських громад, що часто мають обмежені ресурси і слабку цифрову інфраструктуру, масштабні «смарт»-проекти можуть бути неадекватними або економічно невиправданими; натомість більш прийнятними є гібридні рішення – доступні друковані карти з паралельною, але простою цифровою присутністю.

У вітчизняних роботах, які аналізують трансформації внутрішнього туризму, що настали з початком великомасштабних бойових дій, підкреслюється зміщення попиту у бік безпечних, близьких і символічних маршрутів, інтерес до місцевої спадщини та готовність підтримувати локальний бізнес [7, 8, 9]. Це створює унікальну можливість для малих населених пунктів підвищити видимість завдяки простим, але якісним інформаційним продуктам; проте на практиці багато громад не мають професійних навичок у дизайні карт, не володіють даними, і не знають, як виміряти ефект від інформаційних продуктів. Тож є важлива прикладна задача – розробити недорогі, репліковані й контекстуально пристосовані формати

карт, які могли б бути створені силами громади або за участі локальних НГО.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Критичним недоліком множинних досліджень є відсутність емпіричних експериментів, що прямо вимірюють промоційний ефект карт для малих поселень у реальних умовах, особливо в контексті війни або постконфліктного відновлення. Хоча існують роботи, які розглядають вплив рекламних повідомлень на наміри туристів [1], досліджень, що порівнюють ефективність різних картографічних форматів (наприклад, художня нарративна карта проти практично-орієнтованої маршрутної карти) у вигляді польових А/В-тестів, дуже мало. Також бракує системних рекомендацій щодо методології оцінювання – які метрики використовувати (відвідуваність, тривалість перебування, видатки, згадки в соцмережах), які часові горизонти враховувати і як інтегрувати якісні дані опитувань із цифровою аналітикою.

Наукові підходи дають міцну теоретичну базу для розуміння ролі карт у промоції дестинацій, пропонують численні інструменти (від візуального сторітелінгу до аналітики VGI і «смарт»-інтеграцій), але їхня прикладна реалізація для малих українських громад залишається слабо розробленою.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до використання туристичних карт як інструменту промоції локальних дестинацій на основі поєднання традиційних картографічних методів та соціальної аналітики. Уперше для малих населених пунктів Житомирської області здійснено порівняльну оцінку туристичної привабливості з урахуванням інформаційної видимості територій та апробовано модель оцінювання промоційного ефекту карт.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає у поєднанні картографічного, геоінформаційного та соціально-географічного підходів до аналізу туристичної привабливості локальних територій. Запропоновано комплексну схему оцінювання, що інтегрує просторові, інфраструктурні та поведінкові показники, що забезпечує новий рівень точності у визначенні потенціалу туристичних дестинацій. Загальнонаукове значення дослідження полягає у розвитку теоретичних засад картографічної візуалізації як інструменту комунікації між територією та користувачем, а також у формуванні підходів до застосування карт у системі територіального маркетингу.

Викладення основного матеріалу. Для практичного підтвердження можливостей використання туристичних карт як засобу промоції локальних ресурсів проведено оцінку туристичної привабливості невеликих населених пунктів Житомирської області. Цей регіон було обрано через його різноманіття природних і культурних ресурсів, а також потенціал розвитку внутрішнього туризму, який

поки що використовується недостатньо активно. Житомирщина характеризується наявністю значної кількості історичних пам'яток, природних ландшафтів, рекреаційних зон, однак більшість із них залишаються слабо представленими у національних туристичних інформаційних ресурсах.

У межах дослідження було проаналізовано туристичну привабливість кількох малих населених пунктів, що мають потенціал стати важливими осередками локального туризму. До вибірки увійшли Олевськ, Малин, Бердичів та Коростишів – населені пункти з різною історико-культурною та природною специфікою.

Результати аналізу узагальнено в таблиці 1, де наведено ключові характеристики кожного пункту: чисельність населення, відстань від обласного центру, основні туристичні ресурси та потенційні бар'єри розвитку.

Олевськ характеризується поєднанням історико-культурних і природних ресурсів (дерев'яні церкви, народне мистецтво, лісові маршрути), однак має обмежену інфраструктуру та слабку інформаційну промоцію.

Малин вирізняється природними ландшафтами (річка Ірша, ліси) і культурною спадщиною, але страждає від недостатнього рівня туристичних послуг і транспортного сполучення.

Бердичів має найвищий туристичний потенціал серед вибірки завдяки архітектурним пам'яткам і культурним подіям, проте відчуває конкуренцію з більшими містами та потребує оновлення інформаційної інфраструктури.

Коростишів є найближчим до Житомира населеним пунктом і приваблює природними каньйонами та зручним доступом, але потребує вдосконалення сервісів, системи маркування маршрутів та підвищення інформаційної доступності.

Таким чином, таблиця демонструє різноманітність потенціалу і викликів кожного населеного пункту, що дозволяє сформувати порівняльну оцінку їх туристичної привабливості та визначити напрями для стратегічного розвитку локального туризму в регіоні.

З метою систематизації отриманих даних проведено оцінку туристичної привабливості відібраних населених пунктів за такими критеріями:

– Природно-ландшафтна цінність – наявність унікальних або мальовничих природних об'єктів, рекреаційних зон, лісів, водойм.

– Культурно-історичний потенціал – наявність пам'яток історії, архітектури, сакральних об'єктів, етнографічних осередків.

– Інфраструктурна доступність – якість транспортного сполучення, наявність готелів, харчування, інформаційних центрів.

– Інформаційна видимість – наявність туристичних карт, сайтів, навігації, цифрової присутності у відкритих джерелах.

Таблиця 1

Основні характеристики туристичного потенціалу малих населених пунктів Житомирської області

№	Назва населеного пункту	Населення, тис. чол*	Відстань до обласного центру (Житомир), км	Основні туристичні атракції	Потенційні бар'єри
1	Олевськ	12	140	Дерев'яні церкви, лісові маршрути, традиційне народне мистецтво	Обмежена інфраструктура, слабка промоція, складна дорога до деяких об'єктів
2	Малин	25	80	Природні ліси, річка Ірша, історичні будівлі, музеї	Недостатнє забезпечення проживанням, транспортним сполученням
3	Бердичів	45	45	Костели, монастир, архітектурна спадщина, культурні події	Висока конкуренція з більшими містами, необхідність оновлення туристичної інформації
4	Коростишів	17	40	Природні каньйони/кар'єр, близькість лісових зон, зручний доступ із Житомира	Розвиненість сервісу, маркування маршрутів, інформаційна доступність

* дані Державної служби статистики України, станом 2021 рік.

Таблиця 2

Комплексна оцінка туристичної привабливості малих населених пунктів Житомирської області

№	Населений пункт	Природно-ландшафтна цінність	Культурно-історичний потенціал	Інфраструктурна доступність	Інформаційна видимість	Безпекові умови	Сумарна оцінка
1	Олевськ	5	3	2	2	4	16
2	Малин	4	3	3	3	4	17
3	Бердичів	3	5	4	4	4	20
4	Коростишів	5	3	4	3	5	20

– Безпекові та соціально-психологічні умови – сприйняття території як безпечної, комфортної для відпочинку, рівень гостинності місцевої громади.

Оцінювання здійснювалося за п'ятибальною шкалою (1 – низький рівень, 5 – високий).

Отримані результати свідчать, що Бердичів та Коростишів мають найвищу інтегральну привабливість (по 20 балів), однак їхні переваги різняться за структурою (табл. 2).

– Бердичів вирізняється високим культурно-історичним потенціалом і відносно доброю інфраструктурою.

– Коростишів має надзвичайно високу природну привабливість та добрі безпекові умови, що робить його перспективним для розвитку природного й активного туризму.

– Малин демонструє збалансовані показники між природною цінністю та доступністю, однак йому бракує системної промоції.

– Олевськ має значні природні ресурси, але низький рівень туристичної інфраструктури та інформаційної видимості, що знижує його поточну привабливість.

Транспортна доступність є одним із ключових чинників формування туристичної привабливості

територій. Вона визначає можливість та зручність прибуття туристів до певного населеного пункту, а також впливає на тривалість, вартість і комфорт подорожі. У контексті розвитку локального туризму, особливо в умовах зростання внутрішніх переміщень населення, транспортна інфраструктура виступає не лише логістичним, а й маркетинговим інструментом – забезпечуючи зв'язок між туристичними атракціями, населеними пунктами та обласним центром.

Оцінювання транспортної доступності населених пунктів Житомирської області, що мають потенціал для розвитку локального туризму здійснено на основі аналізу автомобільних та залізничних маршрутів, стану дорожнього покриття, інтенсивності транспортного сполучення та віддаленості від головних трас (таблиця 3).

Результати показують, що Бердичів, Коростишів і Малин характеризуються доброю транспортною доступністю (4 бали). Це зумовлено наявністю магістральних автошляхів, регулярного автобусного та залізничного сполучення, що робить ці міста привабливими для організованих і самостійних туристів.

Натомість Олевськ має помірну транспортну доступність (3 бали) через свою північну віддале-

Оцінка транспортної доступності туристичних пунктів Житомирської області

№	Населений пункт	Основні транспортні шляхи	Наявність залізничного сполучення	Оцінка (1–5)	Коментар
1	Бердичів	М21 (Житомир–Вінниця), Т0601	Є	4	Хороше авто- та залізничне сполучення, часті маршрути, близькість до Житомира та Вінниці
2	Коростишів	М06 (Київ–Чоп)	Є	4	Розташований поблизу міжнародної траси, зручний для туристів із Києва
3	Малин	Т0603 (Житомир–Малин–Київ)	Є	4	Добра транспортна доступність, стабільне автобусне та залізничне сполучення
4	Олевськ	Т0608 (Овруч–Олевськ–Сарни)	Є	3	Віддалене розташування, місцями незадовільний стан доріг, обмежена кількість рейсів

ність від головних магістралей області та недостатній розвиток дорожньої інфраструктури. Це ускладнює його відвідування, особливо під час несприятливих погодних умов.

Для практичної перевірки ефективності туристичних карт як інструменту промоції було обрано м. Коростишів – населений пункт із високими показниками природно-ландшафтною цінності, безпекових умов і транспортної доступності, визначених попередніми дослідженнями. Саме поєднання зручного розташування (поблизу траси Київ–Чоп), мальовничих природних локацій (гранітні каньйони, ліси) та наявності історико-культурних пам'яток (маєток Олізарів, костел Різдва Пресвятої Діви Марії) робить Коростишів оптимальним полігоном для тестування впливу картографічного продукту на підвищення туристичної видимості міста.

Результати попереднього аналізу свідчать, що хоча Коростишів має високий природний потенціал (5 балів із 5) та добру інфраструктурну доступність (4 бали), рівень його інформаційної видимості залишається лише середнім (3 бали). Це означає, що створення якісної туристичної карти може суттєво покращити сприйняття міста як дестинації для короткотермінових візитів, одноденних турів та екологічного туризму.

Важливою умовою ефективності туристичних маршрутів є дотримання комплексу базових вимог, які забезпечують безпеку, логічність та привабливість подорожі для відвідувачів.

Передусім, маршрут повинен бути логічним і безпечним. Це означає, що траса має бути спланована таким чином, щоб уникати небезпечних або важкодоступних ділянок, а також передбачати наявність пішохідних переходів, освітлення й безпечних відстаней від автомобільних шляхів.

Не менш важливою є послідовність розміщення об'єктів, яка повинна формувати логічну або тематичну цілісність. Турист, проходячи маршрут, має відчувати смислову зв'язність між точками зупи-

нок – чи то історичний наратив, чи природний контекст, чи мистецька ідея. Така композиційна послідовність сприяє глибокому сприйняттю культурного чи природного середовища дестинації.

Ще одним важливим критерієм є доступність маршруту, тобто можливість його проходження без спеціальної фізичної чи технічної підготовки. Маршрут має бути орієнтований на широку аудиторію – від місцевих мешканців і сімей із дітьми до гостей міста. Це передбачає зручний рельєф, помірну протяжність і наявність можливостей для короткочасного відпочинку.

Нарешті, ефективний туристичний маршрут повинен характеризуватися комфортністю та естетичною привабливістю. Йдеться про наявність зон відпочинку, оглядових майданчиків, лавок, озеленення, а також візуальну узгодженість простору. Гармонійне поєднання природних і культурних елементів робить маршрут не лише інформативним, а й емоційно приємним для відвідувачів, сприяючи формуванню позитивного іміджу території.

У сукупності ці вимоги забезпечують інтегральну якість туристичного маршруту, що поєднує безпечність, пізнавальність, естетичну насолоду та комфорт, створюючи цілісний туристичний продукт, здатний підвищити привабливість дестинації.

На основі польового обстеження та інвентаризації об'єктів та з дотриманням базових вимог було розроблено пішохідний туристичний маршрут «Історичний Коростишів», протяжністю близько 2,6 км (орієнтовна тривалість – 2 години). Маршрут охоплює центральну історичну частину міста та поєднує культурні, сакральні й рекреаційні об'єкти (рис. 1).

Основні локації маршруту (таблиця 4):

1. Сквер Шевченка – історичний парк на місці колишнього маєтку графів Олізарів, що поєднує природну мальовничість і культурну спадщину.

2. Кращавчий музей – експозиційний центр, який презентує історію Коростишева та навколишнього регіону.



Рис. 1. Мапа туристичного маршруту «Історичний Коростішів»

3. Костел Різдва Пресвятої Діви Марії – неоготична пам’ятка архітектури кінця XIX ст.

4. Плебанія костелу – допоміжна споруда сакрального ансамблю, що зберегла історичну автентичність.

5. Скульптурна алея Віталія Рожика – простір сучасного мистецтва, який відображає каменерізню традицію міста.

6. Господарська споруда маєтку Олізарів – залишок історичної садиби графів, цінний для пізнання локальної архітектурної спадщини.

7. Фонтан на Червоній площі – сучасний урбаністичний елемент, який завершує маршрут у центральній зоні відпочинку.

Об’єкти маршруту підібрано за принципом поєднання історичної глибини та сучасної привабливості, що дозволяє туристам отримати комплексне уявлення про розвиток міста – від шляхетського минулого до сучасного культурного середовища.

Запропонований маршрут відповідає ключовим вимогам туристичного планування: є компактним, логічно структурованим, тематично цілісним і орієнтованим на широку аудиторію. Його реалізація у формі друкованої та цифрової карти створює підґрунтя для сталого розвитку міського туризму й може бути масштабована на інші громади Житомирської області.

Для визначення реального впливу туристичних карт на промоцію локальних дестинацій було проведено комплексну оцінку їхнього промоційного ефекту за низкою кількісних і якісних показників. Основна увага приділялася виявленню змін у рівні зацікавленості відвідувачів, підвищенні інформаційної видимості населеного пункту та покращенні туристичного досвіду після впровадження картографічного продукту.

Оцінювання ефекту здійснювалося за чотирма ключовими метриками:

Очікуване зростання відвідувань – визначалося на основі опитування туристів та експертної оцінки потенційного приросту відвідувачів після впровадження картографічного матеріалу.

Збільшення тривалості перебування – фіксувалося за результатами анкетування, де респонденти зазначали, чи сприяла карта відкриттю нових об’єктів і бажанню залишитися в місті довше.

Рівень задоволеності відвідувачів – визначався через опитування туристів після проходження маршруту за критеріями інформативності, зручності та естетичної привабливості карти.

Порівняльний аналіз здійснювався на основі короткострокового пілотного тестування, проведеного упродовж двох місяців (червень–липень). До запровадження туристичної карти кількість щотижневих відвідувачів ключових об’єктів маршруту (Костел Різдва Пресвятої Діви Марії, Сквер Шевченка, Скульптурна алея) становила в середньому 320 осіб. Після розповсюдження друкованих і цифрових карт цей показник зріс до 460 осіб, що відповідає приросту на близько 44%.

Окрім кількісного збільшення, спостерігалось покращення якісних характеристик відвідувань. За результатами опитування, понад 65% респондентів зазначили, що карта допомогла їм самостійно спланувати маршрут, а 52% відзначили, що дізналися про нові об’єкти, які не були раніше позначені на онлайн-картах або в навігаторах.

Результати опитування туристів свідчать, що наявність доступного картографічного матеріалу підвищує рівень задоволеності туристів і стимулює «сарафанне» поширення інформації про дестинацію. Це, у свою чергу, створює передумови для ста-

Туристичні об'єкти маршруту «Історичний Коростишів»

№	Назва, адреса	Фотографія	Опис об'єкту
1	Сквер Шевченка, вул. Шевченка, 4		Міський парк створений у 1820 році на місці маєтку графа Густава Олізера, представника відомої польської шляхетської родини, що володіла містом з 1565 року. Від колишнього маєтку збереглися кілька колон та купальня з кам'яною мордою лева, які сьогодні мають статус пам'ятку місцевого значення.
2	Краєзнавчий Музей Соборна пл., 17		Музей презентує експозицію, присвячену історії Коростишева, природі району та життю видатних діячів краю. У фондах – понад 10 000 експонатів: археологічні знахідки, предмети побуту XIX–XX ст., етнографічні матеріали, документи та фотографії.
3	Костел Різдва Пресвятої Діви Марії вул. Дарбіняна, 7		Неоготичний костел, зведений у 1896 році за сприяння графів Олізарів. Храм є діючою пам'яткою сакральної архітектури, вирізняється стрункими шпилями, вітражами та автентичними внутрішніми розписами. У радянський період костел використовувався не за призначенням, але у 1990-х був відновлений і нині належить римо-католицькій громаді.
4	Плебанія костелу вул. Дарбіняна, 9		Будівля плебанії – колишній дім священника, зведений поруч із костелом Різдва Пресвятої Діви Марії. Є цінним прикладом допоміжної сакральної архітектури кінця XIX ст. Сьогодні використовується для потреб парафії.
5	Скульптурна алея Віталія Рожика пров. Дарбіняна		Алея створена місцевим скульптором Віталієм Рожиком – відомим майстром каменю, роботи якого прикрашають не лише Коростишів, а й інші міста України. Уздовж алеї розташовані авторські кам'яні композиції, виконані з місцевого граніту, що підкреслюють мистецький потенціал регіону, званого як центр каменерізного ремесла.
6	Господарська споруда маєтку Олізарів, вул. Дарбіняна		Фрагмент історичного маєтку родини Олізарів, що зберігся донині. Споруда є типовим прикладом допоміжної архітектури дворянської садиби XIX ст. Сьогодні споруда частково перебудована, але зберігає риси історичного стилю.
7	Фонтан, Червона пл.		Сучасна міська зона відпочинку, розташована на центральній площі. Фонтан є частиною благоустрою оновленого громадського простору, який поєднує сучасний урбаністичний дизайн з історичним середовищем центру міста.

Результати опитування відвідувачів маршруту «Історичний Коростишів»

Показник	Частка респондентів, %
Оцінили карту як «зручну та інформативну»	78
Відзначили покращення орієнтації у місті	72
Висловили бажання відвідати Коростишів повторно	64
Рекомендуватимуть маршрут іншим	81

лого збільшення туристичного потоку без суттєвих витрат на рекламу.

Попередній аналіз сезонності попиту, що найбільша активність відвідувачів спостерігається в травні–серпні, коли природні умови є сприятливими для пішохідних прогулянок і коротких екскурсійних турів. В осінній період (вересень–жовтень) попит дещо знижується, але стабільно підтримується за рахунок шкільних екскурсій і внутрішніх мандрівників із Житомира та Києва.

Діаграма сезонності демонструє, що після впровадження карти спостерігається не лише зростання загальної кількості відвідувачів, а й розширення активного туристичного сезону – з'являється більша кількість відвідувань у міжсезоння, що свідчить про підвищення впізнаваності маршруту.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що туристичні карти виступають ефективним засобом промоції локальних туристичних ресурсів, особливо в контексті розвитку внутрішнього туризму та посилення ролі малих громад у післявоєнному відновленні України. Результати аналізу засвідчили, що якісно розроблена карта може виконувати не лише навігаційну функцію, але й виступати потужним маркетинговим інструментом, який формує позитивний імідж території, стимулює повторні відвідування та підтримує місцеву економіку.

На прикладі Житомирської області виявлено, що найбільш перспективними для розвитку локального туризму є населені пункти з поєднанням природної та культурної привабливості, добрими транспортними зв'язками та високим рівнем безпеки. Серед них Коростишів демонструє найвищий потенціал для використання картографічних засобів промоції завдяки зручному розташуванню, виразним природним ландшафтам і наявності історико-культурних об'єктів.

Розроблений пішохідний маршрут «Історичний Коростишів» довів практичну ефективність поєд-

нання друкованої та цифрової карти як засобів підвищення туристичної видимості дестинації. Проведене тестування показало, що після впровадження карти кількість відвідувань основних туристичних об'єктів зросла майже на 44%, а рівень задоволеності туристів – на понад 30%. Це свідчить про безпосередній вплив картографічного інструменту на поведінку відвідувачів і сприйняття міста як привабливої туристичної локації.

Перспективи використання результатів дослідження. Практичні результати дослідження дозволяють сформулювати низку рекомендацій для органів місцевого самоврядування та туристичних організацій:

1. Провести інвентаризацію локальних туристичних ресурсів із подальшим створенням інтерактивних карт та баз даних.

2. Розробити доступні друковані карти з урахуванням пішохідних, велосипедних та автотуристичних маршрутів.

3. Забезпечити інтеграцію карт із цифровими платформами (Google Maps, OpenStreetMap, Leaflet) для розширення аудиторії користувачів.

4. Регулярно проводити моніторинг ефективності карт за показниками відвідуваності, онлайн-згадок і відгуків користувачів.

Таким чином, туристичні карти можна розглядати не лише як допоміжний навігаційний інструмент, а як комплексний засіб територіального маркетингу, що здатний стимулювати розвиток локального бізнесу, сприяти зростанню зайнятості та підвищенню якості туристичного досвіду. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого масштабування практики створення картографічних продуктів у громадах Житомирщини та інших регіонів України, забезпечуючи сталий розвиток локального туризму в поствоєнний період.

Література

1. Zhen W., Huang S., Tian Z., Yang X. A Novel Visual Narrative Framework for Tourist Map Design Based on Local Chronicles: A Case Study of the Songshan Scenic Area. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2024. № 13 (2). 45. <https://doi.org/10.3390/ijgi13020045>
2. Guo Y., Yu M., Yu M., Zhao Y. Impact of destination advertising on tourists' visit intention: The influence of self-congruence, self-confidence, and destination reputation. *Journal of Destination Marketing & Management*. 2024. № 31. 100852. <https://doi.org/10.1016/j.jdmm.2023.100852>
3. Zhou X., Xu C., Kimmons B. Detecting tourism destinations using scalable geospatial analysis based on cloud computing platform. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2015. № 54. P. 144-153. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.07.006>

4. Peng X., Huang Z. A novel popular tourist attraction discovering approach based on geo-tagged social media big data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2017. № 6 (7). 216. <https://doi.org/10.3390/ijgi6070216>
5. Santos T., Nogueira Mendes R., Farias-Torbidoni E. I., Julião R. P., Pereira da Silva C. Volunteered Geographical Information and Recreational Uses within Metropolitan and Rural Contexts. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2022. № 11 (2). 144. <https://doi.org/10.3390/ijgi11020144>
6. Astaburuaga J., Martin M. E., Leszczynski A., & Gaillard J. C. Maps, volunteered geographic information (VGI) and the spatio-discursive construction of nature. *Digital Geography and Society*. 2022. № 3. 100029. <https://doi.org/10.1016/j.diggeo.2022.100029>
7. Bobek V., Gotal G., Horvat T. Impacts of the 2022 war in Ukraine on the travel habits of Ukrainian tourists. *Naše Gospodarstvo / Our Economy*. 2023. 69(3). C56–67. <https://doi.org/10.2478/ngoe-2023-0018>
8. Kostynets V. Development of internal tourism and hospitality in Ukraine. *Tourism and Travelling*. 2022. № 3 (1). P. 25-33 [https://doi.org/10.21511/tt.3\(1\).2022.04](https://doi.org/10.21511/tt.3(1).2022.04)
9. Shevchuk, L.; Gerasymchuk, O.; Vasilieva, L. Geography and tourism: analysis of Zhytomyr Polissya as tourism potential. *Geography and Tourism* 2023. № 4. С. 44-52. <https://doi.org/10.17721/2308-135X.2024.76.44-52>

Дата першого надходження рукопису до видання: 24.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ДОСВІД КРАЇН ЄВРОПЕЙСЬКОГО СОЮЗУ ЩОДО РОЗВИТКУ СТАЛОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТУРИЗМУ

Сапко О.Ю.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса
sapko-olga@ukr.net

В роботі проаналізовано екологічний туризм як одну з ключових форм туристичної діяльності, яка сприяє реалізації принципів сталого розвитку. Особлива увага приділяється ролі екологічного туризму в економічному, соціальному та екологічному контекстах, а також його значенню для покращення іміджу держави через реалізацію екологічно орієнтованої політики. Розкривається потенціал екологічного туризму в ЄС, де цей вид діяльності активно інтегрується в інші галузі та сприяє формуванню екологічно чистого сектора в національних економіках. У роботі детально проаналізовано міжнародно-правову базу, яка стосується екологічного туризму. Всі документи поділено на дві групи: ті, що безпосередньо регулюють екологічний туризм, і ті, що торкаються його опосередковано в контексті сталого розвитку. Визначено, що більшість правових актів мають профілактичний характер і не містять дієвих механізмів контролю чи санкцій. Водночас вони закладають основу для соціальної та економічної вигоди місцевого населення, акцентуючи на потребі встановлення міжнародних стандартів у сфері екологічного туризму. Особлива увага приділена сучасній політиці ЄС щодо розвитку сталого туризму. Проаналізовано документи «Шлях переходу для туризму» (2022 р.) та «Європейський порядок денний для туризму до 2030 року», які визначають екотуризм як частину промислової екосистеми й акцентують на необхідності цифрової трансформації, скорочення споживання енергії, води та зменшення обсягів відходів. Зазначено важливість урахування специфіки регіонів та активного залучення місцевих громад у процеси планування та реалізації туристичних стратегій. У дослідженні наголошено на великому значенні сільського та агротуризму як складових екологічного туризму, які виступають не лише як інструмент збереження біорізноманіття, культурної спадщини та традицій, але й як реальний механізм диверсифікації доходів, створення робочих місць, зменшення депопуляції та підтримки малого фермерства. Підкреслюється, що розвиток екологічного туризму вимагає фінансової підтримки, доступу до транспортної та цифрової інфраструктури, прозорості у взаємодії між учасниками ринку, а також формування чітких правових норм, які б забезпечували реальне дотримання екологічних принципів у туристичній діяльності. Роль ЄС у цьому процесі полягає в координації дій між країнами-членами, підтримці конкурентоспроможності галузі та сприянні співпраці всіх зацікавлених сторін. *Ключові слова:* екологічний туризм, сталий розвиток, туристична політика ЄС, сталий туризм, збереження біорізноманіття.

Experience of European union countries in the development of sustainable eco-tourism. Sapko O.

The paper analyzes eco-tourism as one of the key forms of tourism activity that contributes to the implementation of sustainable development principles. Particular attention is paid to the role of eco-tourism in economic, social, and environmental contexts, as well as its importance for improving the image of the state through the implementation of environmentally oriented policies. The potential of ecotourism in the EU is revealed, where this type of activity is actively integrated into other industries and contributes to the formation of an environmentally friendly sector in national economies. The paper provides a detailed analysis of the international legal framework relating to ecotourism. All documents are divided into two groups: those that directly regulate eco-tourism and those that indirectly affect it in the context of sustainable development. It is determined that most legal acts are preventive in nature and do not contain effective control mechanisms or sanctions. At the same time, they lay the foundation for social and economic benefits for the local population, emphasizing the need to establish international standards in the field of ecotourism. Particular attention is paid to the current EU policy on the development of sustainable tourism. The documents "Transition Pathway for Tourism" (2022) and "European Agenda for Tourism to 2030" were analyzed, which define ecotourism as part of the industrial ecosystem and emphasize the need for digital transformation, reduction of energy and water consumption, and reduction of waste. The importance of considering the specific characteristics of regions and actively involving local communities in the planning and implementation of tourism strategies is noted. The study emphasizes the great importance of rural and agritourism as components of ecotourism, which serve not only as a tool for preserving biodiversity, cultural heritage, and traditions, but also as a real mechanism for diversifying income, creating jobs, reducing depopulation, and supporting small-scale farming. It is emphasized that the development of eco-tourism requires financial support, access to transport and digital infrastructure, transparency in interactions between market participants, and the formation of clear legal norms that would ensure real compliance with environmental principles in tourism activities. The EU's role in this process is to coordinate actions between member states, support the competitiveness of the industry, and promote cooperation among all stakeholders. *Key words:* eco-tourism, sustainable development, EU tourism policy, sustainable tourism, biodiversity conservation.

Актуальність дослідження. У сучасному світі дедалі гостріше стоять питання зміни клімату, втрати біорізноманіття, забруднення природного середовища. Туризм відноситься до галузей, які можуть як сприяти цим проблемам (через транспорт, надмірне використання ресурсів, масовість), так і бути інстру-

ментом їх пом'якшення через впровадження екологічних практик.

Останнім часом у країнах Європейського Союзу(ЄС) відзначається значне зростання попиту серед туристів на екологічно відповідні форми відпочинку, в тому числі на природу, екологічні марш-

рути, відпочинок у заповідниках, сільський зелений туризм. Це створює потенціал для економічного зростання, розвитку місцевих громад, створення нових робочих місць. Тому такий досвід показує, як ці можливості можна реалізувати ефективно.

Сталий екологічний туризм сприяє збереженню природної та культурної спадщини, підвищує екологічну свідомість населення та туристів, формує позитивний імідж країни як екологічно відповідальної. Це може посилювати конкурентоспроможність туристичного сектору на міжнародному рівні. Країни ЄС активно просувають стратегії й політики, які пов'язані зі сталим розвитком (наприклад, Європейський зелений курс), екологічне мобільне сполучення, нормативи сертифікації, охорони природи. Вони створюють очікування, стандарти та орієнтири для країн, які прагнуть гармонізувати свою політику з європейськими, в тому числі й для України. Досвід ЄС може слугувати моделлю для адаптації та застосування в українських умовах.

Україна перебуває на шляху євроінтеграції, імплементації європейських стандартів та практик. Вивчення досвіду країн ЄС може показати, як країни з високим рівнем екологічної свідомості відповідають на сучасні виклики. Крім того, такий досвід може допомогти уникнути помилок, скористатись кращими практиками, адаптувати законодавство та стратегії до українських реалій. Також екологічний туризм може стати одним із напрямів розвитку сільських регіонів, регіонального туризму, який має великий потенціал в Україні. Це важливо в контексті відновлення після криз, війни та екологічних втрат.

Метою роботи є аналіз та узагальнення досвіду країн Європейського Союзу у сфері розвитку сталого екологічного туризму, що дозволить виявити ефективні практики, механізми та підходи, які можуть бути адаптовані та впроваджені в умовах України для формування екологічно відповідального туристичного середовища та сприяння сталому розвитку регіонів.

Методи дослідження. В роботі використаний метод системного аналізу діючих нормативно-правових документів, щодо сталого екологічного туризму в країнах ЄС та в Україні, узагальнення та інтерпретація отриманих результатів.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Актуальність теми дослідження обумовлена необхідністю впровадження в Україні європейських підходів до сталого розвитку туристичної галузі, зокрема екологічного туризму, що відповідає стратегічним орієнтирам державної політики, які зазначені в Угоді про асоціацію між Україною та ЄС, а саме в галузі туризму: чітка взаємодія між туризмом та захистом навколишнього середовища [1]. Результати дослідження мають значення як для розвитку наукової думки у сфері сталого туризму, так і для практичного застосування у формуванні державної політики,

регіонального планування та розвитку місцевих ініціатив у галузі екологічного туризму.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню даної теми присвячена низка робіт, в тому числі [2–6]. Так в роботі [2] зроблено акцент на залученні місцевих громад і використанні територіальних особливостей для розвитку в країні агротуризму, зеленого бізнесу та збереження культурної спадщини. Багато досліджень описують європейські практики сталого туризму, але небагато з них надають конкретні поради, як саме адаптувати їх з огляду на інфраструктуру, фінансування, безпеку, відновлення після війни в сучасних реаліях України. В роботі [3] зроблено акцент на урахуванні кризових обставин, в тому числі ведіння бойових дій на території країни, пандемію та економічні шоки, які впливають на можливості та бар'єри розвитку сталого екологічного туризму. В роботі [6] проведено аналіз того, як у чотирьох розвинутих державах ЄС (Німеччина, Франція, Нідерланди, Швеція) сталий туризм інтегрується в стратегії економічної безпеки: законодавство, участь зацікавлених сторін, відповідність директивам ЄС. Це показує, як державна політика поєднує сталий розвиток туризму з економічною безпекою, що може бути моделлю чи орієнтиром для політики в Україні.

Результати досліджень. Екологічний туризм є важливим інструментом сприяння стійкому розвитку, що особливо проявляється на місцевому та регіональному рівнях. Ефективна організація та розвинений продукт екологічного туризму позитивно впливають на імідж країни через елементи сталого розвитку та реалізацію принципів «зеленої держави», сприяють формуванню екологічно чистого сектора у структурі національної економіки. Країни ЄС є одним із ключових світових регіонів розвитку екологічного туризму з урахуванням високого потенціалу попиту на рекреацію у природному екологічно чистому середовищі.

Інструменти, що підкреслюють природу екологічного туризму та активно впроваджуються в різні сфери життя європейських країн, це екологічно чиста мобільність, екологічне будівництво, відновлювані джерела енергії, можливості використання та реалізації біологічних продуктів, збереження природного середовища, атрактивних культурних ландшафтів.

Екологічний туризм не завжди однаково розуміється в різних країнах ЄС, його форми динамічні, він проникає в далекі від екологічної орієнтації галузі туристської діяльності, що веде до диверсифікації продукту та структури послуг. Основними формами еколого-туристського продукту в досліджуваному регіоні є науковий туризм, тури природничого характеру, пов'язані зі спостереженням за природою, пригодницький туризм, сільський туризм, подорожі до природних заповідників та інших природних територій, що особливо охороняються.

Територіальною основою та ресурсною базою розвитку екологічного туризму є заповідні природні території. У країнах Європейського союзу єдина класифікаційна схема таких територій представлена національними парками, заповідниками, резерватами, заказниками та регіональними парками. Найбільш диверсифіковану мережу особливо охоронюваних природних територій мають країни Західної Європи.

Усі міжнародно-правові документи, що стосуються екологічного туризму, можна розділити на дві групи. Перша стосується винятково питань екологічного туризму, а друга стосується сталого розвитку та побічно ставиться до екологічного туризму як до одного з його сегментів.

До першої групи входять документи, які стосуються профілактичної охорони в екологічному туризмі. Ці документи захищають природні та культурні цінності, на які може вплинути діяльність екологічного туризму. До них відносяться: Конвенція про охорону всесвітньої культурної та природної спадщини (1972 р.) (Конвенція про всесвітню спадщину); Всесвітня хартія природи (1982 р.); Гаазька декларація з туризму (1989 р.); Конвенція про біологічну різноманітність (1992 р.); Порядок денний на XXI століття (1992 р.).

До другої групи входять документи, що встановлюють превентивні принципи сталого туризму. Екологічний туризм як сегмент сталого туризму має їм відповідати. Ця група включає: Порядок денний на XXI століття для промисловості подорожей і туризму – шлях до охорони навколишнього середовища (Сталий розвиток) (1996 р.); Берлінська декларація про біологічну різноманітність та стійкий туризм (1997 р.); Квебецька декларація з екологічного туризму (2002 р.); Зміна клімату та туризм: відповідь на глобальні виклики (2007 р.) (Давоська декларація); Всесвітня хартія сталого туризму (2015 р.); Рамкова конвенція з етики туризму (2017 р.); Просування стійкого туризму, включаючи екологічний туризм, з метою викорінення бідності та захист навколишнього середовища (2018 р.) (Просування стійкого туризму).

Нажаль, у більшості вказаних вищедокументів немає превентивних заходів. Юридичні документи, пов'язані зі стійким туризмом, наказують більше профілактичних заходів, ніж ті, що належать до екологічного туризму у вузькому значенні. Більшість проаналізованих документів прописують умови, які б полегшували місцевому населенню відчутти економічні вигоди екологічного туризму. Проте, як і раніше, необхідно встановити стандарти розвитку, які затверджуються за погодженням з місцевими зацікавленими сторонами, особливо представники місцевих спільнот, і ці стандарти мають бути підняті на міжнародний рівень.

Більшість вищезгаданих документів наполягають на єдиних стандартах та подоланні розриву між інтересами місцевих спільнот та туристичних ком-

паній за допомогою різних форм співробітництва. У цих документах відсутні правові положення, які зобов'язують суб'єктів екологічного туризму надавати обов'язкову прозорість, не забезпечують ефективної системи покарань, що обмежує їхнє практичне застосування.

До основних документів, що викладають поточне бачення політики ЄС у сфері туризму відносяться «Шлях переходу для туризму» (2022 р.) та «Європейський порядок денний для туризму до 2030 р.» [7, 8].

У «Європейському порядку денному для туризму до 2030 р.» зазначено, що його головною метою є сприяння розвитку туризму, тобто: економічно, екологічно, культурно та соціально стійкий туризм; відповідає на виклики зміни клімату, втрати біорізноманіття та зобов'язання ЄС щодо Порядку денного ООН на період до 2030 р. для сталого розвитку; створює робочі місця та просуває місцеву культуру, продукти та послуги [8].

У той час як документ не згадує конкретно про сільський туризм, він запрошує держави-члени ЄС: взяти до уваги вплив туризму на якість життя місцевих громад у їх політиці; приділити особливу увагу до транспортних потреб периферійних районів, найменше доступних островів і віддалених регіонів; популяризувати активні способи пересування, такі як їзда на велосипеді та інші види туризму [7].

Порядок денний у сфері туризму ґрунтується на шляху переходу до туризму, який є результатом спільної співпраці зацікавлених сторін та передбачає визначення туризму як одного з 14 промислових екосистем, де потрібно прискорити перехід на зелені та цифрові технології. Цей процес було розпочато у 2021 р. відповідно до оновленої промислової стратегії ЄС [8].

Перехідний шлях для туризму вимагає від туристичної спільноти впровадити заходи в 27 областях для зменшення споживання енергії, утворення відходів, споживання води та її забруднення для задоволення зростаючого попиту сталого туризму. Різні території мають різні вихідні точки, тому можливі обмеження щодо виконання цих дій. Консультації із зацікавленими сторонами підкреслюють відсутність доброго транспортного сполучення та цифрового зв'язку як ключових проблем у уповільненні зеленого і перехід до цифрового туризму в сільській місцевості. Подальші дії щодо впровадження екологічного туризму повинні завжди враховувати особливості території.

У контексті шляху для туризму Європейська Комісія також запустила нову туристичну інформаційну панель, з метою допомоги національним і регіональним органам управління у створенні політики та стратегії для переходу туристичного сектора та підвищення стійкості туристичної діяльності в ЄС. Такий підхід визнає відпочинок, туризм і збереження культури і традицій основними аспектами сільських

територій, поряд з виробництвом продуктів харчування, управлінням природними ресурсами та охороною та збереженням природних пейзажів [9].

Такі послуги, як туризм і відпочинок, передбачають збільшення частки робочих місць і доходів у сільській місцевості, оскільки вони пов'язані з сільським господарством, зменшуються. Однак це вказує на можливу синергію між екологічним туризмом і сільським господарством, особливо органічним вирощуванням та виробництвом продукції з географічними зазначеннями. Наприклад, органічне землеробство і зусилля щодо його збереження можуть забезпечити діяльність на фермі, наявність місцевих якісних продуктів, адекватне управління ландшафтами та взаємодією моря і суші в прибережних сільських районах. Просування географічного зазначення також може бути корисними для територій, де вони виробляються. Документ передбачає створення так званих біо-районів, тобто географічних територій, де фермери, громадськість, туристи оператори, асоціації та державні органи укладають угоди про стійке управління місцевими ресурсами на основі органічних принципів і практики [9].

У своїй резолюції від 19.06.2020 р. «Про транспорт і туризм у 2020 р. та надалі» Європейський Парламент підкреслив необхідність довгострокової підтримки туризму для забезпечення конкурентоспроможності та підкреслив, що пандемія стала історичною можливістю модернізувати сектор і зробити його більшим стійким. В резолюції відзначено переваги сільського та агроекотуризму, закликано Європейську Комісію на подальше просування та підтримку ініціатив, які дозволяють створити додаткові джерела доходу для сільської місцевості, робочі місця, запобігати занедбаності земель та їх депопуляції [10].

У резолюції від 25.03.2021 р. «Про створення стратегії ЄС для сталого туризму» Парламент ЄС підкреслює, що пандемія COVID-19 призвела до зміни вимог мандрівників до безпеки та чистоти і більш стійкого туризму і підкреслено, що місцеві ремесла, агротуризм, сільський туризм і екологічний туризм є невід'ємною частиною сталого туризму [11].

У Парламенті ЄС відзначають позитивний внесок сільського туризму у збереження дрібного та різноманітного фермерства, вирішення соціальної нерівності та створення можливостей працевлаштування для жінок. При цьому наголошується, що розвиток сільського туризму в аграрних країнах ЄС сприяє зміцненню агропродовольчого сектору ЄС, екологічній стійкості і добробуту сільських територій. Зазначається, що покращилася співпраця та координація між зацікавленими сторонами, більше залучаються місцеві органи влади до досліджень туризму та ринку професійних комунікацій, маркетингової стратегії, які необхідні для підвищення соціальної, економічної та екологічної складових ефективності агротуризму.

Парламент ЄС закликає Європейську Комісію розглянути можливість збільшення фінансової підтримки для просування велосипедного туризму в Європі, зазначивши, що транскордонні маршрути для активного відпочинку на природі, що підтримується фінансуванням ЄС, може перенаправити туристичні потоки та сприяти меншому розвитку туризму у розвинених регіонах.

У своїй резолюції від 13.12.2022 р. «Про довгострокове бачення сільських територій ЄС» Європейський Парламент закликає на держави-члени вжити заходів для підтримки справедливого переходу та диверсифікації сільської економіки, підкреслює потенціал екологічного туризму в цьому відношенні [12]. Це визнає, що туризм може бути важливим джерелом доходу для сільських громад і вказує на те, що часто недостатньо використаний потенціал рекреаційного рибальства та рибальського туризму для залучення туристів протягом року. Він вимагає докласти зусиль для зміцнення місця сільського туризму, такого як винний туризм, у стратегіях диверсифікації сільської економіки поряд із сільськогосподарським та харчовим секторами. Крім того, цільова група з туризму Комітету з транспорту та туризму (TRAN) неодноразово вимагала окремого бюджету для туризму та справжньої стратегії ЄС щодо сталого туризму.

Європейський Парламент також схвалив підтримку ЄС для агротуризму через його позитивний вплив на сільське населення громад у своїх попередніх мандатах. Наприклад, визнали, що агротуризм є вигідним для збереження біорізноманіття, а також для якості життя, диверсифікації доходів, створення робочих місць та запобігання депопуляції. Крім того, для розвитку агротуризму необхідно забезпечити повний доступ до транспортної мережі, Інтернету та IT-інфраструктури в сільській місцевості. Це підкреслює необхідність підтримки розвитку сільського туризму та гірського агротуризму зі збереженням специфіки цієї області. Парламент ЄС закликав Європейську Комісію та держави-члени підтримати використання потенціалу традиційного вівчарства та козівництва через агротуризм.

Туризм є перш за все компетенцією держав-членів, а роль ЄС полягає в тому, щоб доповнювати, підтримувати та координувати дії країн ЄС. Ця роль широко включає сприяння конкурентоспроможності розвитку сектору та сприяння співпраці. Через його важливість для європейської економіки та зайнятості ЄС рішуче підтримує туристичний сектор – разом із сталими принципами екологічного туризму.

Висновки. Екологічний туризм виступає ефективним інструментом сталого розвитку, особливо на місцевому та регіональному рівнях. Він сприяє формуванню позитивного міжнародного іміджу країн і підтримці «зеленої» економіки. Країни ЄС мають розвинуту політику в сфері екологічного туризму. Вони впроваджують такі інструменти, як

екологічна мобільність, відновлювані джерела енергії, органічне землеробство та охорона природних ландшафтів. У межах ЄС екотуризм представлений у формі наукового, природничого, пригодницького, сільського туризму та відвідування охоронюваних природних територій.

Існують численні міжнародні документи, що регулюють екологічний туризм. Проте більшість із них не містять превентивних заходів, стандартів розвитку або ефективних механізмів контролю й відповідальності. У 2022 р. були прийняті важливі документи ЄС: «Шлях переходу для туризму» та «Європейський порядок денний для туризму до 2030 року», які окреслюють бачення розвитку сталого туризму, включаючи екологічний і сільський туризм, у контексті змін клімату та цифровізації.

Сільський і агроекотуризм мають великий потенціал для розвитку сільських територій, збереження

біорізноманіття, підтримки місцевої економіки, зменшення депопуляції та створення нових робочих місць, особливо для жінок.

Для повноцінного розвитку екологічного туризму потрібна фінансова підтримка, розвиток транспортної та цифрової інфраструктури, зокрема в сільській місцевості та віддалених регіонах. Успішний розвиток екологічного туризму неможливий без активної участі місцевих громад у плануванні, ухваленні рішень і отриманні вигоди від туристичної діяльності. Європейський Союз відіграє координаційну та допоміжну роль у сфері туризму, тоді як основна відповідальність за реалізацію політики покладена на кожну державу-члена ЄС.

Вивчення досвіду країн ЄС щодо впровадження сталого екологічного туризму дозволить Україні у після військовий період більш швидко налагодити цю сферу в країні.

Література

1. Угода про Асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Закон України від 16 вересня 2014 року № 1678-VII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text
2. Lemishko O., Blyzniuk V. Investment appeal and legislative constraintsof green tourism in Ukraine. *Law. Human. Environment*. 2024. № 15(3). P. 48–67. URL: <https://environmentalscience.com.ua/en>
3. Korolchuk L. Development of sustainable tourism in Ukraine in times of war. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія “Проблеми економіки та управління”. 2023. Vol. 7, № 2. С. 18–26.
4. Пасєка С.Р. Зелений туризм як важіль механізму економічного розвитку сільських територій. *SSN 2707-5036 Bulletin of the C herkasy National University. Economic Sciences*. 2020. Issue 4. С. 123–132.
5. Севастьянов Р., Донченко О. Проблеми розвитку зеленого туризму в Україні і світі. *Підприємництво та управління розвитком соціально-економічних систем*. 2023. № 2. С. 246–257.
6. Bulat V. Integrating Sustainable Tourism into EU Strategies for Economic Security through a Comparative Regulatory Analysis. *ACTA UNIVERSITATIS DANUBIUS*. 2025. Vol 21, № 4, P. 184–196. URL: <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/AUDOE/article/view/3516/3126>
7. Перехідний шлях туризму. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/404a8144-8892-11ec-8c40-01aa75ed71a1>
8. Council conclusionson «European Agenda for Tourism 2030». URL: <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-15441-2022-INIT/en/pdf>
9. Новий європейський порядок денний для туризму. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/12/01/new-european-agenda-for-tourism/>
10. Резолюція Європейського парламенту від 19 червня 2020 року про транспорт і туризм у 2020 році. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2020-0169_EN.html
11. Резолюція Європейського парламенту від 25 березня 2021 року про створення стратегії ЄС для сталого туризму. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2021-0109_EN.html
12. Резолюція Європейського парламенту від 13 грудня 2022 року щодо довгострокового бачення розвитку сільських територій ЄС – до сильніших, пов’язаних, стійких і процвітаючих сільських територій до 2040 року. URL: https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0436_EN.html

Дата першого надходження рукопису до видання: 03.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЕКОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ В КОНТЕКСТІ ЄВРОІНТЕГРАЦІЇ УКРАЇНИ

UDC 620.9:504:327

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.34>

CASE STUDIES TOWARDS ENERGY TRANSITION IN THE EU, SWITZERLAND, AND UKRAINE

Bilokon A.

GCIP Regional Acceleration Center for Innovation, Technology,
and Start-Ups in Mykolaiv Region of Ukraine
alona.bilokon@gmail.com

This paper provides a comparative analysis of energy transition strategies in the European Union, Switzerland, and Ukraine, examining institutional frameworks, policy instruments, and implementation practices. Employing a multi-level case study methodology that combines legislative review, policy evaluation, and best-practice analysis, the study identifies key drivers, barriers, and lessons shaping national decarbonization pathways. Despite differences in governance, market maturity, and geopolitical context, all three cases demonstrate commitments to climate neutrality, renewable energy deployment, and energy efficiency. The EU exemplifies a supranational regulatory approach through the European Green Deal, Renewable Energy and Energy Efficiency Directives, and the Emissions Trading System. Switzerland illustrates the effectiveness of decentralized governance and citizen participation under Energy Strategy 2050, integrating hydro, solar, and efficiency measures supported by carbon taxation. Ukraine is navigating economic transformation, adopting renewable energy, and aligning national legislation with European standards under the Energy Strategy 2035. Highlighted cases of decarbonization in some EU countries (Germany, Denmark, Poland, Sweden), as well as Switzerland, and Ukraine demonstrate successful models of technological innovation, stakeholder collaboration, and policy implementation. Findings indicate that coherent legal frameworks and institutional stability are crucial to accelerating low-carbon transitions. This study offers actionable insights for policymakers and experts, as well as emerging economies seeking resilient, innovation-driven pathways toward sustainable energy systems and climate neutrality. *Key words:* energy transition, decarbonization, renewable energy, EU Green Deal, Swiss Energy Strategy 2050, Ukraine Energy Strategy 2035, sustainable development, comparative analysis.

Тематичні дослідження енергетичного переходу в ЄС, Швейцарії та Україні. Білоконь А.О.

У статті здійснено порівняльний аналіз стратегій енергетичного переходу в Європейському Союзі, Швейцарії і Україні з урахуванням інституційних рамок, політичних інструментів та практик реалізації. Використовуючи багаторівневий метод кейс-стаді, що поєднує аналіз законодавства, оцінку політики та дослідження найкращих практик, дослідження визначає ключові рушійні чинники, бар'єри і успішні кейси, які формують траєкторії декарбонізації держав. Попри відмінності у системах врядування, підходах у формуванні енергетичних ринків та геополітичному контексті, усі три кейси демонструють спільну відданість цілям кліматичної нейтральності, розвитку відновлюваної енергетики та підвищенню енергоефективності. Європейський Союз виступає прикладом наднаціонального регуляторного підходу, втіленого через Європейський зелений курс, Директиви з відновлюваної енергії та енергоефективності, а також Систему торгівлі викидами. Швейцарія ілюструє ефективність децентралізованого врядування та громадської участі в межах «Енергетичної стратегії 2050», поєднуючи розвиток гідро-, сонячної енергетики та заходів з енергоефективності, підтриманих вуглецевим оподаткуванням. Україна, перебуваючи у процесі економічної трансформації, досягла прогресу у впровадженні відновлюваної енергетики та гармонізації національного законодавства з європейськими стандартами в межах «Енергетичної стратегії України до 2035 року». Наведені приклади успішної декарбонізації у деяких країнах ЄС (Німеччині, Данії, Польщі, Швеції), а також Швейцарії та Україні демонструють ефективні моделі технологічних інновацій, міжсекторальної співпраці та реалізації енергетичної політики. Результати дослідження свідчать, що узгоджені правові рамки і інституційна стабільність є критичними чинниками прискорення низьковуглецевого переходу. Дослідження пропонує практичні висновки як для політиків і експертів, так і для країн, що розвиваються, які прагнуть забезпечити стійкі, інноваційно орієнтовані шляхи до формування кліматично нейтральної енергетичної системи. *Ключові слова:* енергетичний перехід, декарбонізація, відновлювана енергетика, Європейський зелений курс, Енергетична стратегія Швейцарії 2050, Енергетична стратегія України 2035, сталий розвиток, порівняльний аналіз.

Problem Statement. The urgent need for global transition to sustainable and low-carbon energy systems arises from challenges related to climate change, energy security, and economic growth. Despite having diverse economic and political backgrounds, the European Union, Switzerland, and Ukraine all strive to achieve energy transition goals. A comparative assessment of their strategies can help identify com-

mon features, best practices, and effective tools for policy development.

Research Relevance. The energy transition constitutes a fundamental pillar of efforts to achieve climate neutrality, sustainable economic growth, and security of energy supply in Europe. A comparative analysis of the experiences of the EU countries, Switzerland, and Ukraine is particularly pertinent in the context of

emerging geopolitical realities and the global drive toward decarbonization. These three cases have been deliberately selected: the European Union, which has established an extensive legislative framework to accelerate the shift toward renewable energy; Switzerland, a non-EU European country that pursues its own distinct energy strategy; and Ukraine, an EU candidate state undergoing energy sector reforms. The comparison of such diverse political and institutional contexts provides valuable insights into the dynamics of the energy transition. This study, therefore, enhances understanding of how variations in institutional arrangements and regulatory frameworks influence both the pace and the effectiveness of energy transformation processes.

Relevance of the Research to Scientific and Practical Objectives. The present research aligns with and advances key scientific and practical objectives in the domain of sustainable energy policy and governance. It contributes to the theoretical development of policy design and the empirical understanding of how institutional arrangements and international cooperation frameworks facilitate the energy transition. By identifying effective mechanisms for integrating renewable energy sources into national energy systems, the study enhances the evidence base for policy formulation. The comparative analytical approach adopted in this work provides policymakers and researchers with context-sensitive insights that support the design of coherent strategies to accelerate decarbonization, strengthen energy security, and promote sustainable economic development.

State of the Art. *Climate Commitments and Policy Framework.* The cornerstone, which is a legally binding international treaty on climate change, is the Paris Agreement [1]. It was adopted on December 12, 2015 by 196 parties at COP 21 in Paris. Its aim is to limit global warming to well below 2, preferably to 1.5 degrees Celsius, compared to pre-industrial levels. Moreover, in July 2021, the European Commission (EC), in response to the climate crisis, adopted a set of policies – the European Green Deal [2], which will make Europe the world’s first climate-neutral continent by 2050. Besides, the Sustainable Development Goals [3] provided by the UN serve as a tool to prevent climate change. In September 2015, UN Member States adopted the 2030 Agenda for Sustainable Development, which gives the Global Sustainable Development Report [4] a role in the monitoring and reviewing the new Agenda. *Responsibility and the Role of the Human and Social Sciences in Energy Transition.* Since 1987, the planetary boundaries of greenhouse gases have been exceeded and our livelihoods are being endangered due to the ever-increasing pace of climate change. This is where climate justice is critical. It implies two important aspects: One, the emission of greenhouse gases must be reduced to zero, and two, responsibility must be taken for the individual and national CO₂ emissions in the past years [5]. The transformation of the local and national energy systems in democratic countries as Germany or Ukraine is

primarily a matter for civil society, which takes actions in economic and state domains – and is often supported by contributions from the Social Sciences and the Humanities, so called „Human Sciences” [6]. Social sciences currently offer roadmaps of solutions for a feasible social transformation in Germany, which includes an extensive structural and economic program with numerous focal points. In view of the global climate situation, the energy transition is currently the highest priority [7]. Therefore, it is important to consider its various layers, ranging from how the energy transition projects came about [8] to the development of anthropogenic climate change [9]. Energy transitions are not sudden revolutionary advances that follow periods of prolonged stagnation, but rather continuously unfolding processes that gradually change the composition of sources used to generate heat, motion and light [10]. In conjunction, Ukrainian scientists are also making important contributions in the nuanced energy conversion of various types of renewable sources in their country [11].

Recent strategic initiatives, such as the EU Green Deal, Switzerland’s Energy Strategy 2050 [12], and Ukraine’s Energy Strategy 2035 [13], reflect different approaches to energy transition. Prior research has focused mainly on national frameworks and renewable energy promotion but lacks comprehensive comparative perspectives involving both developed (EU, Switzerland) and developing (Ukraine) contexts. This study fills that gap by examining legislative instruments, market actors, and implementation practices across these countries.

Research Gap. Although the significance of the energy transition for achieving climate neutrality and sustainable development is broadly recognized, the literature still lacks a comprehensive understanding of the mechanisms through which policy design, market configuration, and institutional capacity interact to determine transition outcomes. Existing studies predominantly focus on the experiences of the European Union and its member states, while the comparative perspectives of smaller or non-EU economies remain largely overlooked. In particular, the ways in which countries such as Switzerland and Ukraine, characterized by differing levels of economic development, governance structures, and degrees of integration with the EU energy market, can adapt and internalize European transition models have received limited scholarly attention. This study seeks to address this gap by providing a systematic comparative analysis of the EU, Swiss, and Ukrainian cases, thereby contributing to a more nuanced understanding of the institutional diversity shaping energy transition trajectories in Europe.

Scientific Novelty. The novelty of the study lies in its comprehensive comparative framework that simultaneously analyzes the EU, Switzerland, and Ukraine as energy transition actors with distinct political and economic contexts. The paper identifies shared structural components of successful energy transitions, such as stakeholder collaboration, regulatory consistency, and

technological innovation, that can be replicated in other regions.

Methodological and Theoretical Significance. This study employs a comparative case study methodology that integrates qualitative analysis of policy documents, legislative acts, and national energy transition programs with the examination of exemplary best practices. Such a multi-level analytical design allows for the identification of both structural and contextual factors influencing the effectiveness of energy transition policies. By situating empirical findings within a broader theoretical framework, the research advances methodological approaches to cross-national comparison in sustainability studies.

Introduction

The transition to a sustainable and low-carbon energy system is a global imperative driven by the need to address climate change and ensure secure and affordable energy supplies. In recent years, many countries have embarked on ambitious energy transition journeys, implementing various strategies and policies to shift from conventional fossil fuels to renewable and cleaner energy sources. This article presents a comparative analysis of energy transition case studies in the European Union, Switzerland, and Ukraine, shedding light on the diverse approaches, challenges, and successes experienced by these regions.

The European Union, as a frontrunner in energy transition, has set ambitious targets under the Clean Energy Package, aiming to achieve a 32% share of renewable energy by 2030 and a 40% reduction in greenhouse gas emissions compared to 1990 levels. The EU has implemented a combination of regulatory measures, support schemes, and research initiatives to foster the deployment of renewable energy technologies, improve energy efficiency, and promote a more integrated and interconnected energy market. The EU case study provides insights into the policy framework, market dynamics, and lessons learned from its ongoing energy transition efforts.

Switzerland, a country known for its hydroelectric and PV power generation, has been actively diversifying its energy mix and expanding its renewable energy capacity. Through a combination of national energy strategies, innovative financing mechanisms and public engagement, Switzerland aims to increase the share of renewable energy sources, improve energy efficiency, and reduce dependence on fossil fuels. The case study on Switzerland highlights the country's unique energy landscape, explores its challenges and successes, and teaches valuable lessons to other nations seeking to embark on a similar energy transition path.

Ukraine, as a country with a significant reliance on fossil fuels, is undergoing a transformative energy transition journey driven by energy security, economic development, and environmental sustainability. Irrespective of the challenges faced, Ukraine has made notable progress in diversifying its energy sources, increasing energy efficiency, and attracting investment into renew-

able energy. The case study on Ukraine delves into the country's energy transition policies, regulatory framework, and experiences in navigating the complexities of energy transition.

By examining these case studies, this paper aims to identify common trends, best practices, and key challenges encountered by different countries and institutions in their energy transition endeavors. It also seeks to provide valuable insights for policymakers, researchers, and stakeholders involved in shaping the future of sustainable energy systems. In this article, we will comparatively analyze the key priorities between the energy transition strategies of the EU countries, Switzerland and Ukraine respectively, characterize the key players of the European energy market, as well as highlight the best cases in decarbonization of Germany, Denmark, Poland, Sweden, Switzerland as well as Ukraine.

Energy Transition Strategies and Legislation

Energy transition essentially refers to the shift from fossil fuels to renewable sources of energy. This transition is driven by the need to reduce carbon emissions and mitigate the effects of climate change. The key sources of sustainable energy include solar, wind, hydro, geothermal, and biomass power. Energy transition involves the adoption of new technologies, policies, and business models to enable the deployment of renewable power sources at scale. Some of the key drivers of energy transition include declining costs of sustainable energy technologies, increasing public awareness of climate change, and supportive government policies. Moreover, this very transition has significant implications for the global economy, energy markets, and energy-intensive industries. It is expected to lead to the transformation of the energy sector, with the emergence of new players and business models. Energy transition also presents significant opportunities for innovation and investment in renewable power technologies and related infrastructure.

European Union. Energy transition, energy efficiency, and the green economy have been among the top priorities of the European Union as well as a vast number of other countries worldwide. Over the years, several legislative and programmatic initiatives have been put in place to address these issues, with the view of reducing carbon footprint and promoting sustainable development.

The EU has been actively working towards minimizing its carbon footprint and fostering the implementation of renewable energy sources. The European Green Deal, announced in December 2019, aims to make Europe climate-neutral by 2050. With a view to achieve this, the EU has set a goal of reducing greenhouse gas emissions by at least 55% by 2030 compared to 1990 levels. In addition, the EU has established several legislative initiatives such as the Renewable Energy Directive [14], the Energy Efficiency Directive [15], and the Energy Performance of Buildings Directive [16] to put forward energy transition.

Simultaneously, energy efficiency has been an integral part of the EU's energy policies. The EU has defined an objective to reduce primary energy consumption by 32.5% by 2030 compared to 2005 levels. The Energy Efficiency Directive, which was adopted in 2012, aims to improve energy regulation by aiming to target 32.5% in energy savings by 2030. The directive requires Member States to establish national energy efficiency goals and to implement measures in order to achieve them.

The role of the green economy in this context is crucial. Green economy is a type of economy that is low carbon, resource-efficient and socially inclusive. The EU has been encouraging the development of the green economy through several initiatives. The Circular Economy Action Plan [17], adopted in 2020, aims to make the EU's economy more circular by promoting reuse, repair, and recycling of products and materials. The EU also supports the development of a sustainable finance framework, which aims to promote investments that are environmentally neutral.

Moreover, reducing CO₂ footprint is a crucial element of the EU's efforts to combat climate change. The EU has established several programs to cut down on CO₂ emissions. The Emissions Trading System (ETS) [18] is one of the key programs, which puts a price on CO₂ footprint to incentivize companies to lower their release. The EU has also established the Effort Sharing Regulation [19], which sets binding national targets for reducing emissions from sectors not covered by the ETS, such as transport, buildings, and agriculture.

In conclusion, the EU has put in place several legislative and programmatic initiatives to address energy transition, energy efficiency, the green economy, and reducing CO₂ emissions. These initiatives demonstrate the union's commitment to combating climate change and promoting sustainable development.

Switzerland. Switzerland has set ambitious goals for reducing its carbon footprint and has implemented various policies to promote the implementation of renewable energy sources and energy efficient measures. The Swiss Energy Strategy 2050 and the new energy act aim to minimize the country's reliance on fossil fuels and increase the share of renewable energy sources in the energy mix. The strategy includes steps to promote the installation of renewable energy systems, such as ground-mounted PV systems and wind turbines.

The Federal act on a secure electricity supply [20] comprises a number of initiatives to decrease the country's carbon emissions and increase the share of renewable energy sources in the energy mix. One of the key provisions of the law is the introduction of a CO₂ tax on fossil fuels, which will encourage the use of renewable energy sources and energy-efficient technologies. The law also embraces measures to promote the installation of renewable energy systems, such as ground-mounted PV systems and wind turbines.

Switzerland has been extensively incorporating international legislation to prevent climate change,

including the Paris Agreement, aimed at limiting global warming to well below 2°C above pre-industrial rates. Switzerland has pledged to reduce its greenhouse gas emissions by 50% by 2030, compared to 1990 levels, and achieve carbon neutrality by 2050.

Ukraine. Ukraine has established an extensive legal and policy basis for sustainable development. National Sustainable Development Goals for 2030 have been defined by the presidential decree. These nationally adopted SDGs are accompanied by a framework for monitoring progress, with annual reports. The State Environmental Policy Strategy (Environmental Policy) [21] and the more recent National Economy Strategy [22] both identify sustainable development as a key goal and principle, comprising references to sustainable development in numerous other national sectoral policy documents. As for renewable energy sources, 2003 was marked by signing the Law of Ukraine "On renewable energy sources" [23]. In 2019, the Law of Ukraine "On Principles of Monitoring, Reporting and Verification of Greenhouse Gas Emissions" [24] and the Law of Ukraine "On regulation of activities using ozone-depleting substances and fluorinated greenhouse gases" [25] were endorsed, followed by the Law of Ukraine "On energy efficiency" [26] in 2021.

Being heavily dependent on fossil fuels, especially natural gas, Ukraine is seeking to diversify its energy mix as well as reduce its carbon footprint. The Ukrainian Energy Strategy 2035, adopted in 2017, aims to increase the share of renewable energy sources in the energy mix to 25% by 2035. The strategy comprises measures to promote the installation of renewable energy systems, namely solar, wind, and biomass.

The analysis of energy transition strategies and legislation in the European Union, Switzerland, and Ukraine demonstrates both shared objectives and context-specific approaches to sustainable energy development. In the EU, comprehensive frameworks such as the European Green Deal, Renewable Energy Directive, and Energy Efficiency Directive reflect a coordinated, supranational effort to achieve climate neutrality by 2050, emphasizing decarbonization, energy efficiency, and the promotion of a green economy. Switzerland, while not an EU member, implements an ambitious Energy Strategy 2050 that prioritizes hydro and solar energy, energy efficiency, and the integration of CO₂ taxation to incentivize low-carbon technologies. Ukraine, facing a fossil-fuel-dependent energy system, has developed its Energy Strategy 2035 to diversify the energy mix, expand renewable energy deployment, and reduce greenhouse gas emissions through a combination of national legislation and alignment with international climate commitments.

These cases illustrate the critical role of legislative and policy frameworks in guiding energy transitions. They highlight how energy strategies must be adapted to specific national contexts, balancing resource availability, technological potential, and institutional capacity. Comparative examination of these approaches contrib-

utes to a deeper understanding of the mechanisms that enable effective transition to sustainable, low-carbon energy systems, offering insights for both policymakers and researchers seeking to accelerate decarbonization and strengthen energy security.

Key Players in the Energy Market

European Union Energy Market. The European energy market is a complex and highly competitive domain with a variety of players involved in different segments, featuring such as major energy companies, national energy companies, renewable energy companies, transmission system operators (TSOs), distribution system operators (DSOs), energy traders as well as gas suppliers.

Major energy companies such as E.ON [27], Enel [28], ENGIE [29], and RWE [30] operate in various segments of the European energy market, involving electricity and gas generation, transmission, and distribution. These companies have significant market share, being involved in large-scale infrastructure projects, such as offshore wind farms and gas pipelines. *National energy companies*, such as EDF [31] in France, Iberdrola [32] in Spain, and Vattenfall [33] in Sweden, are state-owned or partially state-owned companies that operate in their respective national markets. These companies play a crucial role in ensuring energy security and implementing national energy policies.

Here is a brief overview of leading European and national energy companies. ENI [34] is an Italian multinational engaged across the entire energy value chain, from exploration and production to refining, marketing, and power generation. EDF (Électricité de France) is a major French utility specializing in electricity generation and distribution, as well as gas and renewable energy. TotalEnergies [35], another French multinational, operates in oil and gas production, refining, marketing, and increasingly in electricity and renewable energy. RWE, a German company, ranks among Europe's largest electricity producers, with operations spanning power generation, gas, and renewables. E.ON, also based in Germany, focuses on electricity generation and distribution, gas supply, and renewable energy development. Shell [36], headquartered in the Netherlands, is one of the world's largest energy corporations, active in oil and gas exploration, refining, marketing, and expanding rapidly into renewables.

Renewable energy companies, such as Ørsted [37], Vestas [38], and Siemens Gamesa [39], specialize in renewable energy generation technologies, including wind, solar, and hydropower. These companies are becoming increasingly important in the European energy mix as the region aims to reduce its carbon emissions and transition towards a low-carbon economy. *TSOs*, such as TenneT [40] in Germany and RTE [41] in France, are responsible for the operation and maintenance of the high-voltage electricity transmission systems in the respective countries. They ensure that electricity is transported efficiently and reliably from the generation

sources to the distribution networks. *DSOs*, such as Enedis [42] in France and E.ON in Germany, operate the low-voltage electricity distribution networks that deliver electricity to homes and businesses. They play a critical role in maintaining the reliability and security of the electricity supply. *Gas suppliers*, such as Equinor [43] in Norway, and TotalEnergies in France, supply natural gas to Europe through pipelines or as liquefied natural gas. *Energy traders*, such as Vitol [44], Trafigura [45], and Glencore [46], trade energy commodities, namely crude oil, natural gas, and electricity. They crucially affect the balance of supply and demand in the market and are often involved in large-scale infrastructure projects and long-term supply contracts.

These players, along with many other smaller companies, are active players in the European energy market, which is undergoing significant transformation as the region seeks to reduce its carbon emissions and transition towards a more sustainable energy system.

Swiss Energy Market. Switzerland's energy market is characterized by a diverse array of key players operating across various segments. Despite limited domestic energy resources, the country has developed a robust energy infrastructure, relying on a mix of hydroelectric, nuclear, and renewable energy sources, complemented by strategic imports.

Axpo Holding AG [47] is Switzerland's largest producer of renewable energy, primarily through its extensive hydropower assets. The company manages approximately 60 hydropower plants and holds nearly 60% of the country's nuclear power capacity, including full ownership of the Beznau nuclear plant and significant stakes in the Leibstadt and Gösgen plants. Additionally, Axpo is expanding its renewable energy portfolio to include solar and wind power. Alpiq Holding AG [48] operates a diversified energy portfolio encompassing hydroelectric, nuclear, and renewable energy sources. The company is involved in the planning and construction of new nuclear power stations in collaboration with Axpo and BKW, aiming to replace aging facilities and ensure long-term energy security. BKW Energie AG [49] is a leading utility company engaged in the production and distribution of electricity, gas, and heat. It operates a mix of hydroelectric and thermal power plants and is actively involved in the development of renewable energy projects. BKW also participates in the joint nuclear power initiatives with Axpo and Alpiq. EOS Holding SA [50] is a strategic holding company based in Lausanne, Switzerland. Its purpose is to coordinate and represent the interests of its stockholders, the principal electric companies of French-speaking Switzerland, Romande Energie SA [51], Groupe E SA [52], the City of Lausanne, Services Industriels de Genève, and FMV SA, in activities based on two main axes: the development of renewable energy sources and the optimization of energy distribution networks. Gaznat SA [53] is a Swiss natural gas company that operates in the gas supply and trading segment of the energy market. It is responsible for the import and

distribution of natural gas in Western Switzerland and controls several natural gas storage facilities in the country. Gaznat is actively involved in initiatives to reduce carbon emissions and contribute to a CO₂-neutral energy supply in the region by 2050.

These companies, together with several smaller entities, play a vital role in shaping the Swiss energy market and safeguarding the country's energy security. Nevertheless, given Switzerland's limited domestic energy resources, the country relies significantly on imports from neighboring countries while actively investing in and expanding renewable energy sources.

Ukrainian Energy Market Overview. The Ukrainian energy sector is characterized by a mix of state-owned enterprises and private companies, each playing a pivotal role in the country's energy landscape.

Naftogaz [54] of Ukraine is the nation's largest state-owned oil and gas company, responsible for the exploration, extraction, transportation, and distribution of natural gas and crude oil. It operates an extensive pipeline network, including over 4,700 km of oil pipelines, making it the second-largest oil transportation system operator in Europe. In 2024, Naftogaz contributed approximately UAH 104 billion to the state budget, accounting for 7% of total government revenues. DTEK Group [55] is the largest private energy investor in Ukraine. Established in 2005, DTEK operates across various segments, including coal mining, electricity generation from thermal, wind, and solar sources, and electricity distribution. The company has invested over €12 billion in the energy sector since its inception. Ukrtransgaz [56], a subsidiary of Naftogaz, manages the natural gas transmission system in Ukraine. It is responsible for transporting natural gas from production fields to storage facilities and distribution networks, playing a crucial role in maintaining the country's energy infrastructure. Energoatom [57], a state-owned enterprise, operates Ukraine's nuclear power plants, providing approximately 55% of the country's electricity. The company oversees four nuclear power plants with 15 reactors, making Ukraine one of the leading countries in nuclear energy production. Kyivenergo [58], a subsidiary of DTEK, supplies electricity and heat to the capital city, Kyiv. It operates several thermal power plants and district heating networks, ensuring reliable energy services to the city's residents.

Collectively, these entities are integral to the functioning and security of Ukraine's energy market. However, the sector faces challenges due to ongoing geopolitical tensions and the need for modernization to meet future energy demands.

The energy markets of the European Union, Switzerland, and Ukraine exhibit distinct structures shaped by their respective economic, regulatory, and technological contexts. In the EU, a combination of major transnational and national companies (E.ON, RWE, ENEL, EDF, Vattenfall), leading renewable energy firms (Ørsted, Vestas), and regulatory operators

(TenneT, RTE) reflects a highly integrated and competitive market environment that drives innovation and facilitates cross-border energy flows. Switzerland's market, by contrast, is dominated by a few large companies, Axpo, Alpiq, and BKW, that manage hydroelectric and nuclear assets while gradually expanding renewable energy portfolios, illustrating a model in which local-scale governance and energy diversification coexist. Ukraine's energy sector is characterized by key actors such as Naftogaz, DTEK, Energoatom, and Ukrtransgaz, which are central to ensuring national energy security, modernizing infrastructure, and supporting the country's ongoing energy transition under complex geopolitical and economic conditions. This comparative overview highlights how different market structures, regulatory frameworks, and strategic priorities shape the implementation of energy transition policies across Europe and beyond.

Best Cases in Decarbonization

Many EU member states, such as Germany, Denmark, Poland, and Sweden, as well as Switzerland, all being leaders in the global energy transition, have implemented various projects to promote the adoption of renewable energy sources and energy efficiency measures. Ukraine, in its turn, also has certain achievements in decarbonization. Here are some of examples of energy transition projects from each country.

Cases of Decarbonization in Some EU Countries.

Germany: the city of Hamburg has put forward a comprehensive energy transition program, which includes measures to promote the adoption of renewable energy sources, energy-efficient buildings, and sustainable transportation [59]. The Energiepark Mainz, a 6 MW PEM-electrolysis Power-to-Gas facility, demonstrating plant efficiencies based on total power consumption and energy utilization, and highlighting that participation in secondary-control-reserve markets is key to improving economic feasibility. [60]. *Denmark:* the island of Samsø is powered entirely by renewable energy sources, including wind, solar, and biomass. It has become a model for sustainable energy, having attracted many visitors who are interested in learning about its energy transition [61]. The city of Copenhagen has implemented an energy transition program, which includes measures to promote energy-efficient buildings, sustainable transportation, and the adoption of renewable energy sources [62]. *Poland:* the Pomeranian Solar Valley is a cluster of solar energy companies located in the Pomerania region. The cluster has helped to promote the adoption of solar energy in the region, having created numerous new job openings in the renewable energy sector [63]. The GreenEvo program [64], launched by the Polish government, fosters innovative and environmentally friendly technologies. The program has supported the development of many energy-saving and renewable energy projects in Poland. *Sweden:* the approval of the 250 MW Bäckhammar Solar Park in Värmland, Sweden, expected to generate approximately 250 GWh

of electricity annually and power some 50,000 households, marks a significant milestone in the country's renewable energy strategy. Developed by Sunna Group AB on reclaimed forest land, the project exemplifies how large-scale solar installations can advance national decarbonization objectives, foster site reuse, and support the transition away from fossil-fuel-dependent power systems [65]. The Gothenburg "2030 Climate Neutrality Action Plan" (Climate City Contract) sets a target of achieving net-zero greenhouse-gas emissions by 2030, with strategic emphasis on decarbonizing transport and mobility, buildings and energy systems, waste, industrial processes and land use. The plan adopts a multi-level governance framework that involves municipal, regional and private-sector actors, commits to periodic monitoring and updates, and includes pathways and portfolios of actions designed to align local systems with the broader EU "Mission Cities" agenda for climate-neutral urban development [66].

The given countries have implemented various energy transition projects to promote the adoption of renewable energy sources and energy efficiency measures. These projects have helped to decrease carbon emissions and increase the share of renewable energy sources in the energy mix, and have become models for sustainable energy in other countries around the world.

Energy Transition in Switzerland: Federal and Cantonal Initiatives. Switzerland's commitment to energy transition is articulated through its national policy framework and reinforced by proactive measures at the cantonal and municipal levels. The Swiss Energy Strategy 2050, established by the Federal Council, outlines a comprehensive approach to reducing carbon emissions, enhancing energy efficiency, and increasing the share of renewable energy sources in the national energy mix.

At the cantonal level, several regions have implemented innovative projects to advance these objectives: *Canton of Basel*: the canton has introduced the "Baselbieter Energiepaket" [67], a strategic initiative aimed at reducing non-renewable heating energy demand and promoting energy-efficient construction. This program is supported through partnerships with financial institutions to facilitate the financing of energy-efficient projects. *Canton of Zurich*: Zurich's Energy Master Plan [68] aligns with the principles of the "2000-Watt Society," targeting a reduction in per capita energy consumption and CO₂ emissions. The plan employs the Building Park Model to assess and optimize energy use across the city's building stock. *Canton of Lucerne*: the canton has committed to decarbonizing process energy by supporting industries in transitioning from fossil fuels to renewable energy sources. The climate-adaptation component of the Climate Strategy for the Canton of Lucerne engaged experts via workshops and group interviews to identify climate impacts, assess risks and opportunities across nine action areas, compile existing measures, and elaborate 49 new adaptation measures

[69]. *Canton of Geneva*: the canton has adopted the "Energy Master Plan 2020–2030" [70], setting clear targets for reducing energy demand and optimizing renewable energy use. This plan is integral to Geneva's broader strategy to achieve carbon neutrality by 2050. Additionally, urban centers such as *Lausanne* undertake significant building retrofitting programs [71]. For instance, the city implements energy-efficient renovations in municipal buildings, achieving substantial reductions in energy consumption and carbon emissions.

These cantonal and municipal initiatives exemplify Switzerland's decentralized approach to energy transition, where local governments play a pivotal role in implementing and customizing strategies that align with national objectives. This multi-level governance model enhances the effectiveness of energy policies and fosters innovation in sustainable energy practices across the country.

Leading Renewable Energy Initiatives in Ukraine. Ukraine has made significant strides in advancing its renewable energy sector, with several notable projects and initiatives contributing to its decarbonization efforts: *Tyligulska Wind Power Plant Expansion*: DTEK, Ukraine's largest private energy company, is expanding the Tyligulska Wind Power Plant in the Mykolaiv region. The project aims to increase the plant's capacity from 114 MW to 500 MW, with an investment of approximately €450 million. Upon completion, the expanded facility is expected to produce 1.7 TWh of electricity annually, sufficient to power 900,000 homes. This initiative represents the largest private sector investment in Ukraine's energy sector since the 2022 [72]. *Decarbonization Fund Leasing Project*: the Decarbonization Fund of Ukraine has implemented its first leasing project to support the adoption of renewable energy technologies. This initiative aims to reduce greenhouse gas emissions and promote the development of renewable energy sources by providing financial support for projects that might otherwise lack sufficient upfront investment [73]. *Critical Infrastructure Solar Project in Chortkiv*: September 2025, a solar energy project was completed in Chortkiv to power critical infrastructure. The solar power plants now cover approximately 20% of the facilities' electricity needs, ensuring reliable municipal water services, reducing CO₂ emissions, and lowering costs for the local water utility company [74]. *Rise Solar and Battery Initiative*: DTEK has partnered with Octopus Energy to launch the €100 million "Rise" initiative, aiming to develop 100 solar and battery projects across Ukraine over the next three years. This project seeks to enhance energy security amid ongoing challenges by stabilizing the power grid, reducing costs for businesses, and increasing energy resilience [75].

These projects exemplify Ukraine's commitment to advancing renewable energy and decarbonization efforts, contributing to a more sustainable and resilient energy future.

The examined cases illustrate the diversity of strategies and approaches employed by European countries and Ukraine to advance energy transition and decarbonization. Germany, Denmark, Poland, and Sweden have implemented large-scale renewable energy projects, energy-efficient infrastructure programs, and innovative policy instruments, positioning themselves as global leaders in sustainable energy. Switzerland's decentralized model, combining federal frameworks such as the Energy Strategy 2050 with proactive cantonal and municipal initiatives, demonstrates the effectiveness of multi-level governance in achieving energy efficiency and renewable energy targets. Ukraine, despite facing significant structural and geopolitical challenges, has made notable progress in expanding renewable energy capacity through projects such as the Tyligulska Wind Power Plant expansion, the Decarbonization Fund Leasing Project, the Chortkiv solar infrastructure, and the Rise Solar and Battery Initiative. These cases highlight that successful decarbonization requires a combination of robust national policies, local implementation, financial mechanisms, and technological innovation. They provide valuable lessons for countries at different stages of energy transition, illustrating how tailored strategies can support the integration of renewable energy, reduce carbon emissions, and enhance energy security. Furthermore, these examples underscore the importance of public-private partnerships, local community engagement, and targeted investments in renewable technologies as critical drivers of a sustainable and resilient energy future.

Conclusions

The comparative analysis of energy transition strategies in the European Union, Switzerland, and Ukraine reveals the complex interplay of policy, institutional frameworks, and market dynamics in shaping sustainable and low-carbon energy pathways. Despite substantial differences in governance structures, economic contexts, and energy system maturity, all three cases demonstrate a commitment to decarbonization, renewable energy deployment, and improved energy efficiency.

Key Priorities in Energy Transition Strategies. The European Union emphasizes large-scale renewable energy deployment, energy efficiency, and the integration of energy markets across member states, supported by legislative instruments such as the European Green Deal, Renewable Energy Directive, and Energy Efficiency Directive. Switzerland, leveraging its abundant hydroelectric resources, combines national and cantonal strategies to diversify its energy mix, promote energy efficiency, and implement innovative financing and citizen engagement mechanisms. Ukraine, in contrast, focuses on energy security, diversification of energy sources, and attracting private investment in renewable energy, while progressively aligning national legislation with European standards under its Energy Strategy 2035.

Key Players in the Energy Market. The study highlights the critical role of multi-level stakeholder engagement in successful energy transition. In the EU, national governments, regulatory authorities, energy companies, research institutions, and civil society actors coordinate to implement policies, deploy technologies, and integrate energy markets. Switzerland illustrates the efficacy of decentralized governance, where cantonal authorities, municipal administrations, and public-private partnerships actively participate in energy planning. Ukraine's energy market demonstrates the importance of state-owned and private entities, such as Naftogaz, DTEK, and Energoatom, in driving infrastructure modernization, renewable energy deployment, and systemic resilience under challenging circumstances.

Best Cases in Decarbonization. The analysis identifies exemplary projects that provide practical lessons in renewable energy adoption, energy efficiency, and stakeholder collaboration. Germany demonstrates comprehensive urban and solar initiatives; Denmark showcases fully renewable islands and district heating systems; Poland illustrates emerging solar clusters and innovation programs; Sweden combines nuclear and bioenergy to reduce emissions; Switzerland implements cantonal renewable projects and building retrofits; and Ukraine has achieved progress with large-scale wind and solar developments, including the Tyligulska Wind Power Plant expansion, the Chortkiv solar infrastructure, and the Rise Solar and Battery Initiative. These cases underscore the significance of integrating robust policy frameworks, financial mechanisms, technological innovation, and community engagement to accelerate decarbonization effectively.

Synthesis. The findings reveal that successful energy transition requires a context-sensitive combination of regulatory clarity, institutional stability, technological advancement, and stakeholder collaboration. Comparative insights from these cases highlight the importance of adapting strategies to national circumstances, while drawing lessons from international best practices. These insights are relevant not only for advanced economies but also for emerging energy markets seeking to develop resilient, low-carbon systems.

Prospects for Future Research. The results of this study provide a foundation for policymakers and researchers to design adaptive and scalable energy transition strategies. Future research should focus on further developments in EU and Ukrainian energy markets, the role of digitalization and smart energy systems, the expansion of the hydrogen economy, and the scaling of community-based renewable energy initiatives. Sector-specific analyses, particularly in battery energy storage system, grid stabilization, and hybrid renewable technologies, offer additional avenues for advancing sustainable energy governance.

References

1. Agreement on climate change : Paris Agreement. 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (Last accessed: 08.10.2025).
2. Initiative to transform the EU into a modern, resource-efficient, and competitive economy : European Green Deal / European Union. 2019. URL: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (Last accessed: 08.10.2025).
3. 17 Sustainable Development Goals : Sustainable Development Goals / United Nations. 2015. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (Last accessed: 08.10.2025).
4. United Nations publication aiming to strengthen the science-policy interface at the High-Level Political Forum on Sustainable Development / Global Sustainable Development Report / United Nations. URL: <https://sdgs.un.org/gsdrr> (Last accessed: 08.10.2025).
5. Previšić B. CO₂: Fünf nach Zwölf. Wie wir den Klimakollaps verhindern können. Wien, 2020. 160 S.
6. Holstenkamp L., Radtke J. Handbuch Energiewende und Partizipation. Wiesbaden, 2018. 1200 S.
7. Flämig D., de Maizière L. Weiter Denken: von der Energiewende zur Nachhaltigkeitsgesellschaft. Berlin, Heidelberg, 2016. 375 S.
8. Erbslöh F. D. Der Weg zur Energiewende. 2021. 525 S.
9. Dessler A. E. Introduction to Modern Climate Change. Cambridge, 2021. 273 p.
10. Smil V. Energy Transitions: Global and National Perspectives. 2nd Edition. Santa Barbara, California, 2017. 296 p.
11. Кудря С. Відновлювані джерела енергії. Київ, 2020. 392 с.
12. Energy Strategy 2050, Switzerland / Swiss Federal Office of Energy. URL: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/policy/energy-strategy-2050.html/> (Last accessed: 25.10.2025).
13. Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність : Енергетична стратегія України на період до 2035 року від 18 серпня 2017 р. № 605-р / розпорядження / Кабінет Міністрів України. URL: https://climate-laws.org/document/energy-strategy-of-ukraine-up-to-2035-approved-by-resolution-no-605-r_fbada (дата звернення: 25.10.2025).
14. Renewable Energy Directive 2009/28/EC / European Commission. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en (Last accessed: 25.10.2025).
15. Energy Efficiency Directive EU/2023/1791 / European Commission. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-targets-directive-and-rules/energy-efficiency-directive_en (Last accessed: 25.10.2025).
16. Energy Performance of Buildings Directive EU/2024/1275, EPBD / European Commission. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-performance-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (Last accessed: 25.10.2025).
17. Circular Economy Action Plan / European Commission. URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/first-circular-economy-action-plan_en (Last accessed: 25.10.2025).
18. EU Emissions Trading System / European Commission. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/carbon-markets/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en (Last accessed: 25.10.2025).
19. Effort sharing 2021-2030: targets and flexibilities : Effort Sharing Regulation / European Commission. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/effort-sharing-member-states-emission-targets/effort-sharing-2021-2030-targets-and-flexibilities_en (Last accessed: 25.10.2025).
20. Federal act on a secure electricity supply. 2023 / Swiss Federal Office of Energy. URL: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/en/home/supply/electricity-supply/federal-act-renewable-electricity-supply.html/> (Last accessed: 25.10.2025).
21. Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року : Закон України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 16, ст. 70. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 12.09.2025).
22. Про затвердження Національної економічної стратегії на період до 2030 року: Постанова від 3 березня 2021 р. № 179 / Кабінет Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#Text> (дата звернення: 12.09.2025).
23. Про внесення змін до статті 9-1 Закону України «Про альтернативні джерела енергії» щодо врегулювання питання генерації електричної енергії приватними домогосподарствами : Закон України від 1 липня 2019 року № 2755-VIII. *Відомості Верховної Ради України*. 2019. № 32, ст. 126. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-19#Text> (дата звернення: 12.09.2025).
24. Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів : Закон України від 12 грудня 2019 року № 377-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2020. № 22, ст. 150. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/377-20#Text> (дата звернення: 12.09.2025).
25. Про регулювання господарської діяльності з озоноруйнівними речовинами та фторованими парниковими газами : Закон України від 12 грудня 2019 року № 376-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2020. № 21, ст. 145. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/376-20#Text> (дата звернення: 12.09.2025).
26. Про енергетичну ефективність: Закон України 21 жовтня 2021 року № 1818-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2022. № 2, ст. 8. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 12.09.2025).
27. E.ON : website. URL: <https://www.eon.de/de/pk.html> (Last accessed: 06.08.2025).
28. Enel Group: Energy, sustainability and innovation : website. URL: <https://www.enel.com/> (Last accessed: 06.08.2025).
29. ENGIE : website. URL: <https://www.engie-deutschland.de/de> (Last accessed: 06.08.2025).
30. RWE : website. URL: <https://www.rwe.com/en/> (Last accessed: 06.08.2025).
31. EDF France. URL: <https://www.edf.fr/> (Last accessed: 06.08.2025).
32. Iberdrola Spain : website. URL: <https://www.iberdrola.es/> (Last accessed: 06.08.2025).
33. Vattenfall Sweden : website. URL: <https://www.vattenfall.se/> (Last accessed: 06.08.2025).
34. ENI Italy : website. URL: <https://www.eni.com/en-IT/home.html> (Last accessed: 06.08.2025).
35. TotalEnergies France : website. URL: <https://www.totalenergies.fr/> (Last accessed: 06.08.2025).
36. Shell : website. URL: <https://www.shell.com/> (Last accessed: 06.08.2025).
37. Ørsted : website. URL: <https://orsted.com/> (Last accessed: 14.08.2025).

38. Vestas : website. URL: <https://www.vestas.com/en> (Last accessed: 14.08.2025).
39. Siemens Gamesa : website. URL: <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home.html> (Last accessed: 14.08.2025).
40. TenneT : website. URL: <https://www.tennet.eu/de> (Last accessed: 14.08.2025).
41. RTE : website. URL: <https://www.rte-france.com/en/home> (Last accessed: 14.08.2025).
42. Enedis : website. URL: <https://www.enedis.fr/index> (Last accessed: 14.08.2025).
43. Equinor : website. URL: <https://www.equinor.com/> (Last accessed: 14.08.2025).
44. Vitol : website. URL: <https://www.vitol.com/> (Last accessed: 14.08.2025).
45. Trafigura : website. URL: <https://www.trafigura.com/> (Last accessed: 29.08.2025).
46. Glencore : website. URL: <https://www.glencore.com/> (Last accessed: 29.08.2025).
47. Axpo Holding AG : website. URL: <https://www.axpo.com/ch/de.html> (Last accessed: 29.08.2025).
48. Alpiq Holding AG : website. URL: <https://www.alpiq.com/> (Last accessed: 29.08.2025).
49. BKW Energie AG : website. URL: <https://www.bkw.ch/de/ueber-uns/energy> (Last accessed: 29.08.2025).
50. EOS Holding SA : website. URL: <https://eosholding.ch/en/> (Last accessed: 29.08.2025).
51. Romande Energie SA : website. URL: <https://www.romande-energie.ch/> (Last accessed: 29.08.2025).
52. Groupe E SA : website. URL: <https://www.groupe-e.ch/de> (Last accessed: 29.08.2025).
53. Gaznat SA : website. URL: <https://www.gaznat.ch/en/> (Last accessed: 29.08.2025).
54. Газопостачальна компанія «Нафтогаз України» : веб-сайт. URL: <https://gas.ua/uk/home> (дата звернення: 03.09.2025).
55. Група ДТЕК : веб-сайт. URL: <https://dtek.com/en/> (дата звернення: 03.09.2025).
56. АТ «Укртрансгаз» : веб-сайт. URL: <https://utg.ua/> (дата звернення: 03.09.2025).
57. Енергоатом : веб-сайт. URL: <https://energoatom.com.ua/> (дата звернення: 03.09.2025).
58. Київенерго : веб-сайт. URL: <https://kievenergo.com.ua/ua/> (дата звернення: 03.09.2025).
59. Hamburg. Renewable Energies : website. URL: <https://marketing.hamburg.de/en/media-service/economy-innovation/renewable-energies> (Last accessed: 16.10.2025).
60. Kopp M., Coleman D., Stiller C. Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the worldwide largest Power-to-Gas plant with PEM electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42(19) DOI:10.1016/j.ijhydene.2016.12.145 (Last accessed: 03.08.2025).
61. Samsø: An Island Community Pointing to the Future. Denmark / United Nations Climate Change : website. URL: <https://unfccc.int/climate-action/un-global-climate-action-awards/climate-leaders/samsø> (Last accessed: 16.10.2025).
62. Christensen L. Renewable Energy Adoption and Carbon Emission Reductions in Copenhagen, Denmark. *International Journal of Climatic Studies*. 2024. 3(3). P. 26-38. DOI:10.47604/ijcs.2971 (Last accessed: 16.10.2025).
63. Poland's Pomeranian SEZ seeks to sell 21-MW solar project : website. URL: <https://renewablesnow.com/news/polands-pomeranian-sez-seeks-to-sell-21-mw-solar-project-1282059/> (Last accessed: 16.10.2025).
64. GreenEvo – Green Technology Accelerator / Polish Ministry of Climate. URL: <https://www.gov.pl/web/climate/greenevo---green-technology-accelerator> (Last accessed: 17.10.2025).
65. Sweden solar park Approved: 250 MW Project Promises Stunning Energy Output : website. URL: <https://www.pvknowhow.com/news/sweden-solar-park-approved-250-mw-project-promises-stunning-energy-output/> (Last accessed: 17.10.2025).
66. 2030 Climate Neutrality Action Plan / City of Gothenburg. URL: https://netzerocities.app/_content/files/knowledge/4455/2030_ccc_gothenburg.pdf (Last accessed: 17.10.2025).
67. Baselbieter Energiepaket / Basel Landschaft. URL: <https://www.basel.ch/politik-und-behorden/direktionen/bau-und-umweltschutzdirektion/umweltschutz-energie/energie/foerderprogramme/baselbieter-energiepaket> (Last accessed: 19.10.2025).
68. Masterplan Energie der Stadt Zürich / Stadt Zürich. Stadtratsbeschluss Nr. 1086/2023. URL: <https://www.stadt-zuerich.ch/de/aktuell/publikationen/2023/masterplan-energie-2023.html> (Last accessed: 19.10.2025).
69. Climate Strategy for the Canton of Lucerne – Climate Adaptation Section : website. URL: <https://www.ebp.global/ch-en/projekte/klimastrategie-kanton-luzern-teil-klimaanpassung> (Last accessed: 19.10.2025).
70. Energy Master Plan / Geneva Council of State. 2020. URL: <https://www.ge.ch/document/energy-master-plan#:~:text=On%202%20December%202020%2C%20the,commit%20Geneva%20to%20energy%20transition.> (Last accessed: 19.10.2025).
71. Swiss-UK team wins Lausanne retrofit contest : website. URL: <https://www.architectsjournal.co.uk/news/swiss-uk-team-wins-lausanne-retrofit-contest> (Last accessed: 19.10.2025).
72. DTEK to invest €450 million to expand Tyligulska windfarm in largest investment since war in Ukraine began. *DTEK* : website. URL: <https://dtek.com/en/media-center/news/dtek-invest-450-million-tyligulska-windfarm-expansion/> (Last accessed: 19.10.2025).
73. The Decarbonization Fund of Ukraine Has Implemented Its First Leasing Project. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine : website. URL: <https://sae.gov.ua/en/news/the-decarbonization-fund-of-ukraine-has-implemented-its-first-leasing-project> (Last accessed: 20.10.2025).
74. Ukraine's first completed solar-powered critical infrastructure project sparks a sustainable energy shift. NEFCO : website. URL: <https://www.nefco.int/news/ukraines-first-completed-solar-powered-critical-infrastructure-project/> (Last accessed: 20.10.2025).
75. Powering Ukraine: DTEK and Octopus Energy Group launch RISE initiative to boost energy resilience. *DTEK* : website. URL: <https://dtek.com/en/media-center/news/powering-ukraine-dtek-and-octopus-energy-group-launch-rise-initiative-to-boost-energy-resilience/> (Last accessed: 19.10.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 28.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

УДК 502.3:504.4.054:556.5:349.6

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.35>

ВПРОВАДЖЕННЯ ЄВРОПЕЙСЬКИХ СТАНДАРТІВ ЩОДО УПРАВЛІННЯ РІЧКОВИМИ БАСЕЙНАМИ В УКРАЇНІ У КОНТЕКСТІ СТРАТЕГІЙ ОХОРОНИ ПРИРОДИ

Уваєва О.І.¹, Шевчук Л.М.², Алпатова О.М.²¹Поліський національний університет
бульв. Старий, 7, 10008, м. Житомир²Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
bio-2016@ukr.net

У статті досліджено сучасний стан та перспективи впровадження інтегрованого управління водними ресурсами в Україні у контексті євроінтеграційних процесів та реалізації стратегій охорони природи. Особлива увага приділена гармонізації національної політики з вимогами Водної рамкової директиви ЄС, аналізу ефективності функціонування басейнового принципу управління та розробленню планів управління річковими басейнами. Розкрито вплив зовнішніх факторів, зокрема збройної агресії Російської Федерації, на екологічний стан водних ресурсів та на процеси формування стратегічних пріоритетів у сфері охорони природи.

Висвітлено роль стратегічної екологічної оцінки у плануванні природоохоронних заходів та формуванні планів управління річковими басейнами (ПУРБ) як ключового інструменту інтеграції з європейськими екологічними стандартами. Проведено узагальнення нормативно-правової бази та інституційних механізмів, що регламентують управління річковими басейнами, із урахуванням міжнародного досвіду. Проаналізовано екологічні виклики – деградацію водних екосистем, забруднення поверхневих і підземних вод, зниження водності річок, посилення негативного впливу змін клімату, а також проблеми недостатнього фінансування природоохоронних заходів і обмеженої інституційної спроможності басейнових рад.

На основі даних Державного агентства водних ресурсів України, міжнародних звітів і сучасних наукових публікацій сформульовано рекомендації щодо підвищення ефективності інтегрованого управління водними ресурсами. Запропоновано напрями гармонізації національної нормативно-правової бази з вимогами ЄС, впровадження сучасних методів моніторингу (дистанційне зондування, автоматизовані системи збору даних), а також фінансових механізмів із залученням міжнародних програм та приватного сектору. Наголошено на необхідності розвитку природоорієнтованих рішень, спрямованих на відновлення водних екосистем, підвищення кваліфікації спеціалістів і розширення участі громадськості у прийнятті рішень.
Ключові слова: інтегроване управління, річковий басейн, водні ресурси, Водна рамкова директива ЄС, стратегія охорони природи, сталий розвиток.

Implementation of European standards for river basin management in Ukraine in the context of nature conservation strategies. Uvaieva O., Shevchuk L., Alpatova O.

The article examines the current state and prospects for the implementation of integrated water resources management in Ukraine in the context of European integration processes and the implementation of nature conservation strategies. Particular attention is paid to the harmonization of national policy with the requirements of the EU Water Framework Directive, the analysis of the effectiveness of the river basin management principle, and the development of river basin management plans. The impact of external factors, in particular the armed aggression of the Russian Federation, on the ecological condition of water resources and on the processes of forming strategic priorities in the field of nature conservation is revealed.

The role of strategic environmental assessment in planning nature protection measures and in shaping River Basin Management Plans (RBMPs) as a key instrument of integration with European environmental standards is highlighted. A generalization of the regulatory and legal framework and institutional mechanisms regulating river basin management is carried out, taking into account international experience. The article analyzes environmental challenges – degradation of aquatic ecosystems, pollution of surface and groundwater, reduction of river flow, intensification of negative impacts of climate change, as well as problems of insufficient funding for environmental measures and the limited institutional capacity of basin councils.

Based on data from the State Agency of Water Resources of Ukraine, international reports, and recent scientific publications, recommendations for improving the effectiveness of integrated water resources management are formulated. Directions are proposed for harmonizing the national regulatory framework with EU requirements, implementing modern monitoring methods (remote sensing, automated data collection systems), as well as financial mechanisms involving international programs and the private sector. Emphasis is placed on the need to develop nature-based solutions aimed at restoring aquatic ecosystems, improving the qualifications of specialists, and expanding public participation in decision-making. *Key words:* integrated management, river basin, water resources, EU Water Framework Directive, nature conservation strategy, sustainable development.

Постановка проблеми. Європейський курс України визначає необхідність глибинної адаптації національного законодавства до права Європейського Союзу, зокрема у сфері охорони та управління вод-

ними ресурсами [1]. Одним із ключових інструментів такої гармонізації є впровадження басейнового принципу управління водними ресурсами, передбаченого Водною рамковою директивою 2000/60/ЄС

[2]. Цей підхід забезпечує інтегроване управління всіма видами вод у межах гідрографічних одиниць – річкових басейнів, із урахуванням екологічних, економічних та соціальних аспектів, що відповідає загальноєвропейським стратегіям охорони природи та збереження біорізноманіття.

Водні ресурси України зазнають значного антропогенного тиску: забруднення промисловими та комунальними стоками, сільськогосподарським поверхневим стоком, деградація прибережних екосистем та зміни гідрологічного режиму [3–5]. Важливим є моніторинг стану вод під час вторгнення Росії в Україну [6], оскільки руйнування водогосподарської інфраструктури створює додаткові ризики для довкілля і суперечить завданням природоохоронних стратегій.

Додатковим викликом є зміни клімату, які зумовлюють підвищення частоти екстремальних гідрометеорологічних явищ, ускладнюючи управління водними ресурсами та водночас посилюючи потребу у впровадженні природоорієнтованих рішень [7]. У цих умовах впровадження європейських стандартів басейнового управління розглядається не лише як вимога інтеграції до ЄС, а й як ключова складова реалізації стратегій охорони природи та забезпечення сталого розвитку водного сектору України.

Актуальність дослідження. Реформа управління водними ресурсами на основі басейнового принципу, закріплена у Водному кодексі України після змін 2016 р., є одним із ключових кроків у наближенні екологічної політики України до стандартів ЄС [8]. Цей підхід не лише визначає механізми розроблення та реалізації планів управління річковими басейнами (ПУРБ), що ґрунтуються на комплексному екологічному моніторингу, інтеграції даних та активній участі громадськості [9], але й безпосередньо пов'язаний із завданнями національних та європейських стратегій охорони природи.

Успішна імплементація басейнового підходу сприятиме досягненню цілей Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС, забезпеченню доброго екологічного стану вод, збереженню біорізноманіття водних і прибережних екосистем та реалізації природоорієнтованих рішень для захисту довкілля. Це створює основу для сталого водокористування, а також гармонізує водну політику України з ширшими природоохоронними пріоритетами ЄС.

З огляду на виклики, пов'язані з воєнним станом, фінансовими обмеженнями та зміною клімату, аналіз прогресу у впровадженні європейських стандартів управління річковими басейнами набуває особливого значення. Він дозволяє визначити не лише пріоритети розвитку водного сектору України, а й ключові напрями посилення стратегій охорони природи, спрямованих на відновлення та збереження водних екосистем у складних соціально-економічних умовах.

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

проведеного дослідження безпосередньо пов'язані з реалізацією національної стратегії інтеграції України до Європейського Союзу та виконанням міжнародних зобов'язань у сфері управління водними ресурсами. Зокрема, дослідження спрямоване на підтримку імплементації положень Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС та Директиви 2007/60/ЄС про оцінку та управління ризиками затоплення, що становлять основу європейських стандартів басейнового управління та водночас інтегровані у ширший контекст стратегій охорони природи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Теоретичні та практичні аспекти впровадження басейнового підходу широко висвітлено у працях українських і зарубіжних науковців. Зокрема, у дослідженні Л. Данилюк [8] розглянуто правові основи застосування басейнового принципу управління водними ресурсами у законодавстві Європейського Союзу та України, акцентовано на необхідності адаптації вітчизняної нормативно-правової бази до вимог Водної рамкової директиви ЄС. Авторка підкреслює, що інтегроване управління річковими басейнами є не лише важливим чинником екологічної безпеки та сталого розвитку у водогосподарській сфері України, але й невід'ємною частиною сучасних стратегій охорони природи.

Хвесик М. А. і Левковська [3] пропонують методологічні основи розробки планів управління річковими басейнами (ПУРБ), узгоджених із міжнародними нормами. У їхніх роботах простежується тісний зв'язок між басейновим управлінням і завданнями збереження водних екосистем, що відповідає концепції природоорієнтованих рішень у європейській практиці. Важливим внеском у цей напрям є праця В. Хільчевського [9], де автор аналізує гідрографічне районування України 2016 р. як реалізацію положень ЄС, підкреслюючи роль моніторингової інфраструктури та водогосподарського зонування у забезпеченні належного екологічного стану водних об'єктів.

Низка дослідників [1] розглядає проблеми та досягнення імплементації екологічного права ЄС в Україні, акцентуючи на необхідності його гармонізації зі стратегічними цілями збереження довкілля. European Environment Agency [10] представляє стандарти моніторингу та оцінки екологічного стану річок, які нині адаптуються до українських умов і водночас стають основою для інтеграції управління річковими басейнами з природоохоронними стратегіями ЄС.

Метою роботи є комплексний аналіз правових, організаційних і науково-технічних засад впровадження європейських стандартів управління річковими басейнами в Україні у контексті стратегій охорони природи, оцінка рівня адаптації національної системи до вимог Водної рамкової директиви ЄС, виявлення ключових проблем і бар'єрів та розроблення практичних рекомендацій щодо підвищення

ефективності інтегрованого управління водними ресурсами з урахуванням завдань збереження та відновлення водних екосистем.

Результати дослідження.

Нормативно-правові засади впровадження європейських стандартів щодо басейнового управління та стратегій охорони природи в Україні

Впровадження басейнового принципу управління водними ресурсами в Україні базується на імплементації положень Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС, яка встановлює рамки для комплексного управління всіма видами вод у межах річкових басейнів [2]. Ця директива поєднує екологічні та природоохоронні підходи, що забезпечують не лише досягнення доброго екологічного стану вод, а й збереження біорізноманіття та відновлення природних екосистем. Законодавчою основою цього процесу є Водний кодекс України, зміни до якого, ухвалені у 2016 р., закріпили визначення районів річкових басейнів (рис. 1), створення басейнових рад, розроблення планів управління басейнами річок та запровадження єдиної системи моніторингу [3, 8].

Згідно з гідрографічним та водогосподарським районуванням, затвердженим 2016 р., на території України сформовано 9 басейнових районів (Дніпро, Дністер, Дунай, Південний Буг, Дон, Вісла, Крим, ріки Чорного та Азовського морів). Це районування є не лише адміністративною основою для формування планів управління річковими басейнами

(ПУРБ), передбачених законодавством, але й ключовим інструментом для інтеграції національних програм у сфері охорони природи.

Таким чином, правові засади басейнового управління в Україні безпосередньо пов'язані з реалізацією стратегій охорони природи, орієнтованих на збереження водних екосистем і прибережних територій. Впровадження європейських стандартів дозволяє поєднати управління якістю вод із ширшими завданнями екологічної політики, спрямованими на забезпечення сталого розвитку та адаптацію до сучасних викликів, включаючи зміну клімату й антропогенний тиск.

Стан та ефективність басейнового управління в Україні. У листопаді–грудні 2024 р. Кабінет Міністрів України затвердив 8 планів управління річковими басейнами (ПУРБ) [12], охопивши основні басейни – Дністер, Дніпро, Дон, Південний Буг, річки Чорного, Азовського, Вісла та Крим, тоді як дев'ятий (Дунайський) план очікує на затвердження [13, 14]. Загалом ці документи охоплюють територію понад 600 000 км² і впливають на водні ресурси для приблизно 40 млн осіб. Розробка ПУРБ здійснювалася за допомогою технічної підтримки програм EU4Environment та міжнародних партнерів (Oieau, UBA) щодо інтеграції стандартів Водної рамкової директиви [15].

У 2025 р. відзначається значний прогрес у впровадженні цих ПУРБ: державні органи активно співпрацюють з Басейновими радами, що створено ще з 2018 р., проте їх інституційний потенціал потре-



Рис. 1. Гідрографічне районування території України за басейнами річок, затверджене у 2016 р. (реалізація положень Водної рамкової директиви ЄС) [11]

бує посилення [16]. Проте виконання програм заходів і досліджувальний моніторинг досі стикаються з викликами: нестаче ефективної та достовірної системи моніторингу поверхневих і підземних вод. Водночас реалізуються тренінги для фахівців Держводагентства та залучення громадськості для підготовки ПУРБ, що підсилює практичну основу басейнового управління.

Таким чином, басейнове управління в Україні зробило суттєві кроки у напрямі інтеграції європейських стандартів: створені ПУРБ, затверджено базові документи, активізовано участь стейкхолдерів; попри це, для підвищення ефективності необхідне розширення моніторингової мережі, посилення ролі Басейнових рад, а також розвиток інституційної спроможності виконання заходів і фінансування.

Аналіз виконання планів управління річковими басейнами (ПУРБ). Станом на кінець 2024 р. в Україні офіційно ухвалено 8 ПУРБ, що стало важливим етапом зближення з вимогами Водної рамкової директиви ЄС; дев'ятий (Дунайський) був доопрацьований і оприлюднений як проєкт на початку 2025 р. [17]. Усі плани містять програми заходів на 2025–2030 рр., опис стану масивів поверхневих і підземних вод, структуру моніторингу та механізми участі громадськості. Загальнонаціональна оцінка підтверджує, що ПУРБ охоплюють понад 600 тис. км² і близько 40 млн населення, що підкреслює масштаб управлінських рішень і потребу

у сталому фінансуванні. Фінансові потреби на реалізацію програм заходів оцінено у €7,7 млрд (із них €7,3 млрд – для вже затверджених восьми ПУРБ), а понад 70 % запланованих інвестицій спрямовано на санітарію та очищення стічних вод.

Порівняльний аналіз фактичної реалізації заходів демонструє помірний, але відчутний поступ у I кварталі 2025 р.: розпочато 6 % заходів (≈100 позицій), ще ≈20 % формально включені до планів, а решта перебувають у підготовчій фазі (табл. 1). Така структура виконання зумовлена як бюджетними обмеженнями, так і тривалістю процедур закупівель, погоджень та стратегічної екологічної оцінки. [18]. Водночас затверджені урядом плани для ключових басейнів (Дніпро, Дністер, Азовський, Дунайський тощо) містять пооб'єктні переліки заходів і відповідальних установ, що створює базу для прискорення впровадження. На міждержавному рівні підтверджено завершення циклу планування – міжнародні партнери відзначили ухвалення 9 ПУРБ як «віху» водної політики України [19].

Ефективність реалізації ПУРБ залежить від розбудови інституційної спроможності басейнових рад, стабільності фінансування та модернізації моніторингової мережі. З огляду на концентрацію >70 % витрат на блок санітарії/очищення, очікуваний короткостроковий ефект – зменшення скидів забруднювальних речовин у міських агломераціях і «гарячих точках». Водночас для досягнення «доброго еко-

Таблиця 1

Прогрес виконання заходів RBMP в Україні (I квартал 2025 р.) [12]

Показник	Значення	Період / примітка
Кількість затверджених ПУРБ	8 із 9	Ухвалено 01.11.2024; план для Дунаю ще очікує ухвалення
Територіальне охоплення ПУРБ	>600 000 км ²	Покриття дев'яти басейнових районів
Населення, на яке поширюється дія ПУРБ	≈40 млн осіб	Орієнтовна кількість бенефіціарів
Оціночна потреба у фінансуванні програм заходів (усього)	€7,7 млрд	Розрахунок для 9 ПУРБ
Потреба у фінансуванні для 8 вже ухвалених ПУРБ	€7,3 млрд	Із загальної потреби €7,7 млрд
Орієнтовне навантаження фінансування на особу	€32/особа/рік	Протягом 6 років
Частка запланованих заходів, спрямованих на санітарію/очищення стічних вод	>70 % (≈70 %)	Пріоритет інвестицій
Частка заходів, які вже розпочаті	6 % (~100 заходів)	Станом на I квартал 2025 р.
Частка заходів, включених у планові документи (формально заплановані, але не стартували)	≈20 %	Станом на I квартал 2025 р.
Частка заходів у підготовчій фазі (оцінка: 100% – 6% – 20%)	≈74 %	Аналітична оцінка на основі пп. 8–9
Період публічних консультацій щодо ПУРБ	грудень 2023 – червень 2024	Включено stakeholder input
Наявність стислих факт-листів (factsheets) по всіх 9 ПУРБ	так (укр/англ)	Доступні резюме з ключовими цифрами

логічного стану» у 2025–2030 рр. критично важливі гідроморфологічні відновлення, контроль дифузного забруднення та впровадження природоорієнтованих рішень, які ПУРБ передбачають, але які стартують повільніше (табл. 1). Узгодженість технічних завдань у планах із вимогами EQS (наказ Міндовкілля № 332 від 01.04.2024) формує єдині критерії для оцінки прогресу.

Екологічний стан та основні виклики для водних ресурсів. Стан водних ресурсів України суттєво погіршився через поєднання тривалого антропогенного навантаження та наслідків війни. За даними Nature Sustainability, війна вплинула на водну інфраструктуру – зруйновано дамби, водозабори та очисні споруди, що призвело до зниження доступу до чистої води та погіршення її якості [20]. Однією з катастрофічних подій стала руйнація Каховської ГЕС у червні 2023 р., що призвела до викиду сотень тонн важких металів – арсену, нікелю, цинку – в річку Дніпро та Чорне море, створивши справжню екотоксичну «бомбу уповільненої дії».

Поряд із прямими наслідками руйнувань, екологічний баланс порушений також через забруднення від харчової, промислової та сільськогосподарської діяльності. Зокрема, Сіверський Донець – одна з найбільш забруднених річок країни – характеризується 4-5 класом якості води: високий рівень фосфатів, фенолів, цинку та інших речовин. Крім того, загалом для України характерні процеси евтрофікації водойм: надлишкове надходження нітратів і фосфатів з полів і стічних вод викликає цвітіння води й окиснення, яке негативно впливає на екосистеми.

Окремий екологічний виклик – погіршення якості вод внаслідок пошкодження очисної інфраструктури. Наприклад, внаслідок вибухів та військових дій були зруйновані очисні станції у Северодонецьку, Лисичанську та Рубіжному, що призвело до скидів неочищених стоків у природні водні системи. Ці фактори разом створюють масштабну загрозу якості води, біорізноманіттю та здоров'ю населення України, що потребує невідкладних заходів для стабілізації та відновлення стану водних екосистем.

Рекомендації щодо підвищення ефективності інтегрованого управління. Удосконалення нормативно-правової бази та інтеграція з WFD. Для підвищення ефективності управління річковими басейнами необхідно завершити адаптацію водного законодавства України до Водної рамкової директиви ЄС (WFD), зокрема у питаннях планування, контролю та участі громадськості. Це дозволить не лише виконати євроінтеграційні вимоги, але й узгодити політику у сфері водних ресурсів із ширшими стратегіями охорони природи, що підкреслюється у концепції IWRM і програмах OECD та UNECE [19].

Посилення інституційної спроможності. Важливо розвивати потенціал басейнових рад та Державного агентства водних ресурсів України через

системне навчання фахівців, забезпечення сучасним обладнанням і програмними рішеннями. Як показує досвід західнобузького регіону, такі заходи сприяють не лише підвищенню ефективності управління, а й формуванню бази для реалізації програм охорони природи на місцевому рівні [19].

Впровадження сучасних моніторингових технологій. Для ефективної охорони довкілля необхідне впровадження сучасних методів – дистанційного зондування Землі, автоматизованих систем збору даних, індикаторів біорізноманіття. Це дасть змогу поєднати моніторинг якості вод із оцінкою стану водних екосистем та підтримати прийняття управлінських рішень [21].

Фінансова стійкість та кліматична адаптація. Необхідно забезпечити комплексне фінансування інтегрованого управління, залучаючи ресурси міжнародних фондів, програм ЄС та приватного сектору. Особлива увага має приділятися фінансуванню природоорієнтованих рішень, які підвищують кліматостійкість водних систем України та сприяють відновленню природних екосистем.

Прозорість та участь громадськості. Для поєднання управління водними ресурсами з охороною природи важливо створювати онлайн-платформи з відкритим доступом до даних ПУРБ, моніторингу та екологічних показників. Це підвищить довіру громадськості та сприятиме залученню суспільства до реалізації природоохоронних стратегій.

Секторальна інтеграція та контроль. Важливо посилити контроль за дотриманням екологічних норм у промисловості й сільському господарстві, запроваджуючи економічні стимули для підприємств, що зменшують вплив на довкілля. Узгодження ПУРБ із іншими директивами ЄС (Marine Strategy, Nitrates) сприятиме інтеграції завдань управління водними ресурсами із загальноєвропейськими підходами до охорони природи [19].

Висновки. У статті проаналізовано правові, організаційні та науково-технічні засади впровадження європейських стандартів управління річковими басейнами в Україні у контексті стратегій охорони природи. Встановлено, що ключовим інструментом гармонізації національної політики з вимогами ЄС є реалізація положень Водної рамкової директиви 2000/60/ЄС, яка поєднує завдання управління водними ресурсами з цілями збереження природних екосистем і біорізноманіття. Аналіз показав суттєвий прогрес у створенні нормативно-правової бази, формуванні басейнових рад та розробці планів управління річковими басейнами, проте рівень виконання цих планів і включення природоорієнтованих рішень залишається недостатнім.

Виявлено основні проблеми: фрагментарність інституційної взаємодії, обмежене фінансування природоохоронних заходів, недостатній рівень моніторингу якості вод і стану водних екосистем, а також слабе залучення громадськості до процесу

прийняття рішень. Водночас позитивними є тенденції розширення застосування інноваційних методів моніторингу, інтеграція міжнародних підходів до інтегрованого управління та включення завдань охорони природи до планувальних документів.

Запропоновано низку рекомендацій для підвищення ефективності інтегрованого управління водними ресурсами та їх поєднання з природоохоронними стратегіями: удосконалення

нормативно-правової бази, посилення інституційної спроможності басейнових рад, впровадження автоматизованих систем екологічного моніторингу, розширення фінансування з міжнародних програм і залучення приватного сектору. Отримані результати мають наукове й практичне значення для формування ефективної політики управління водними ресурсами України та одночасної реалізації стратегій охорони природи в умовах євроінтеграції.

Література

1. Golovko L., Kutsevych M., Serediuk V., Bogdan O. Implementation of EU environmental policy in Ukraine: directions and perspectives. *European Journal of Sustainable Development*. 2020. 9(4), 191–191. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2020.v9n4p191>
2. European Commission. 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*, L327, 2000, 1–73. URL: <https://www.eea.europa.eu/policy-documents/directive-2000-60-ec-of>
3. Хвесик М. А., Левковська Л. В. Управління водними ресурсами: євроінтегративний вектор. Економіка природокористування і сталий розвиток. 2019. № 5. С. 6–13.
4. Хільчевський В.К., Гребінь В.В., Забокрицька М.Р. Управління річковими басейнами: навч. Посібник. К.: ДІА, 2024. 236 с.
5. Diegtiar O. A., Hornyk V. H., Kravchenko S. O., Karlova V. V., Shtal T. V. Improving public water resources policy in Ukraine: Municipal and environmental issues. *Journal of Environmental Management & Tourism*. 2020. 11(3(43)), 669–675. DOI: [https://doi.org/10.14505/jemt.11.3\(43\).20](https://doi.org/10.14505/jemt.11.3(43).20)
6. Хільчевський В. К., Гребінь, В. В. Деякі аспекти щодо стану території районів річкових басейнів та моніторингу вод під час вторгнення Росії в Україну (2022 р.). *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. 3(65), 6–14. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.1>
7. United Nations. URL: <https://www.un.org> (дата звернення: 14.07.2025).
8. Danyliuk L. The River Basin Principle of Water Resources Management in the Legislation of the European Union and Ukraine. *Journal of Vasyl Stefanyk Precarpathian National University*. 2018. 5(2), 99–106. DOI: <https://doi.org/10.15330/jpnu.5.2.99-106>
9. Хільчевський В. К. Характеристика водних ресурсів України на основі бази даних глобальної інформаційної системи FAO Aquastat. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2021. 1(59), 6–16. DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.1>
10. European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu> (дата звернення: 14.07.2025).
11. Державне агентство водних ресурсів України. URL: <https://www.davr.gov.ua/> (дата звернення: 01.08.2025).
12. EU4Environment. Ukraine adopts eight River Basin Management Plans. URL: <https://euneighbourseast.eu/news/latest-news/eu4environment-ukraine-adopts-eight-river-basin-management-plans> (дата звернення: 01.08.2025).
13. ICPDR. Ukraine adopts nine River Basin Management Plans: A major milestone towards sustainable water management. URL: <https://www.icpdr.org/danube-basin/countries/ukraine/ukraine-adopts-nine-river-basin-management-plans-major-milestone> (дата звернення: 30.07.2025).
14. Державне агентство водних ресурсів України. Звіт про стратегічну екологічну оцінку проекту Плану управління річковим басейном річок Приазов'я (2025–2030). URL: <https://davr.gov.ua/fls18/tt6/ReportCEOПриазовуа.pdf> (дата звернення: 04.08.2025).
15. OIEau. Developing River Basin Management Plans in Ukraine. URL: <https://www.oieau.org/en/actualites/river-basin-management-plans-ukraine-insights-kateryna-mudra-oleksii-iaroshevych-eu4environment-water-data-project> (дата звернення: 30.07.2025).
16. Danube Region Strategy. Implementation of river basin management plans is the implementation of the requirements of the EU Water Framework Directive. URL: <https://www.danube-region.com.ua/en/implementation-of-river-basin-management-plans-is-the-implementation-of-the-requirements-of-the-eu-water-framework-directive> (дата звернення: 30.07.2025).
17. EU4WaterData. Ukraine adopts eight River Basin Management Plans: A major milestone towards sustainable water management. URL: <https://www.eu4waterdata.eu/en/blog-news/34-ukraine/400-ukraine-adopts-eight-river-basin-management-plans-a-major-milestone-towards-sustainable-water-management.html> (дата звернення: 28.07.2025).
18. EEAS. Preparation of the Strategic Environmental Assessments for the 9 River Basin Management Plans in Ukraine. URL: https://www.eeas.europa.eu/delegations/ukraine/preparation-strategic-environmental-assessments-9-river-basin-management-plans-ukraine_en (дата звернення: 05.08.2025).
19. OECD. National Policy Dialogue on Integrated Water Resources Management – Proceedings (Kyiv, 15–16 June 2023). URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/about/programmes/water-policy-reforms-in-eecca/ukraine/proceedings_npd_meeting_ukraine_15-16_june_2023.pdf (дата звернення: 01.08.2025).
20. Stokal V., Kurovska A., Stokal M. More river pollution from untreated urban waste due to the Russian-Ukrainian war: a perspective view. *Journal of Integrative Environmental Sciences*. 2023. 20(1), 2281920. DOI: <https://doi.org/10.1080/1943815X.2023.2281920>
21. Kucher A., Krupin V., Rudenko D., Kucher L., Serbov M., Gradziuk P. Sustainable and efficient water management for resilient regional development: The case of Ukraine. *Agriculture*. 2023. 13(7), 1367. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13071367>

Дата першого надходження рукопису до видання: 03.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЕКОЛОГІЯ БІОРІЗНОМАНІТТЯ

УДК 504.064:574.5(477.8)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.36>

БІОМОНІТОРИНГ ПРИРОДНИХ І АНТРОПОГЕННИХ ЕКОСИСТЕМ ВОЛИНО-ПОДІЛЛЯ ЗА УЧАСТЮ ҐРУНТОВИХ ТВАРИН

Бусленко Л.В., Теплюк В.С.

Волинський національний університет імені Лесі Українки
пр. Волі, 13, 43025, м. Луцьк

lesybuslenko@gmail.com, tepluk.vadym@vnu.edu.ua

Інтенсивне землекористування та урбанізація у Волино-Поділлі спричиняють значні трансформації ґрунтового середовища, що призводить до зменшення біорізноманіття безхребетних та змін у функціонуванні екосистем. Ґрунтові тварини, включно з мезо- та макрофауною, відіграють ключову роль у розкладанні органічної речовини, кругообігу поживних речовин та депонуванні вуглецю, тому їхня чисельність, різноманіття та структура угруповань є надійними показниками екологічного стану та стійкості різних біотопів. Метою цього дослідження є оцінка структури, чисельності та індикаторну функцію угруповань ґрунтової фауни у природних екосистемах, таких як ліси та луки, а також у трансформованих антропогенним шляхом екосистемах, зокрема агроугіддях та урбанізованих територіях.

У дослідженні застосовували поєднання польових та лабораторних методів, включно з відбором ґрунтових монолітів, пастками Барбера та стандартизованими методами екстракції Enchytraeidae, всього було опрацьовано 123 зразки. У природних екосистемах середня щільність ґрунтових тварин досягала 1725 инд./м², біомаса становила 13,5 г/м², кількість видів – 25, а індекс Шеннона – 2,7. У трансформованих антропогенно екосистемах ці показники були значно нижчими: середня щільність – 850 инд./м², біомаса – 6,4 г/м², кількість видів – 10,5, а $H' = 2,0$. Природні біотопи характеризувалися угрупованнями з кількох рівнозначних таксонів, таких як Collembola, Acari та Lumbricidae, тоді як у агроугіддях та міських територіях структура була спрощеною, з домінуванням небагатьох груп, переважно Enchytraeidae та Isopoda.

Отримані результати свідчать, що угруповання ґрунтової фауни є чутливими індикаторами антропогенного впливу та можуть надавати важливу інформацію для оцінки стабільності екосистем і якості довкілля. Дослідження також підкреслює значення інтеграції біоіндикаторних показників у системи регіонального моніторингу та пропонує подальші дослідження для визначення внеску окремих таксонів у депонування органічного вуглецю, а також для розробки комплексних стратегій біомоніторингу для сталого землекористування та збереження біорізноманіття у Волино-Поділлі. *Ключові слова:* Волино-Поділля, ґрунтові тварини, біомоніторинг, природні екосистеми, антропогенні екосистеми, індекс Шеннона, біоіндикація, вуглецевий баланс.

Biomonitoring of natural and anthropogenic ecosystems of Volyn-Podillia with the participation of soil animals. Buslenko L., Tepluk V.

Intensive land use and urbanization in the Volyn-Podillia region cause substantial transformations in the soil environment, leading to a reduction in invertebrate biodiversity and alterations in ecosystem functioning. Soil animals, including meso- and macrofauna, play a key role in organic matter decomposition, nutrient cycling, and carbon deposition, making their abundance, diversity, and community composition reliable indicators of the ecological state and resilience of different habitats. This study aimed to assess the structure, abundance, and indicator function of soil fauna communities in natural ecosystems such as forests and meadows, as well as in human-modified ecosystems including agricultural lands and urbanized areas.

The research employed a combination of field and laboratory techniques, including soil monolith sampling, barber traps, and standardized extraction methods for enchytraeids, resulting in a total of 123 analysed samples. In natural ecosystems, the mean density of soil animals reached 1725 ind./m², with a biomass of 13.5 g/m², species richness of 25, and a Shannon diversity index of 2.7. In anthropogenically transformed ecosystems, these values were substantially lower, with a mean density of 850 ind./m², biomass of 6.4 g/m², 10.5 species per sample, and $H' = 2.0$. Natural habitats were characterized by communities with several equally abundant taxa, such as Collembola, Acari, and Lumbricidae, whereas agricultural and urban areas showed a simplified structure dominated by a few groups, primarily Enchytraeidae and Isopoda.

The findings highlight that soil fauna communities are sensitive indicators of anthropogenic impact and can provide crucial information for assessing ecosystem stability and environmental quality. The study also emphasizes the importance of incorporating bioindicator data into regional monitoring frameworks and suggests further research to quantify the contribution of specific taxa to carbon deposition, as well as to develop comprehensive biomonitoring strategies for sustainable land management and biodiversity conservation in the Volyn-Podillia region. *Key words:* Volyn-Podillia, soil animals, biomonitoring, natural ecosystems, anthropogenic ecosystems, Shannon index, bioindication, carbon balance.

Постановка проблеми. Ґрунтові тварини формують важливу складову екосистем, оскільки беруть участь у розкладі органічних решток, кругообігу

поживних речовин, утворенні ґрунтової структури та підтриманні її родючості. Ці організми реагують на зміни у середовищі, тому їхні угруповання засто-

совують як індикатори трансформацій у природних і антропогенних екосистемах. Для Волино-Поділля, де поєднуються ділянки з відносно збереженими природними ландшафтами та території з інтенсивним землекористуванням (сільське господарство, лісогосподарська діяльність, урбанізація), аналіз складу та структури ґрунтової фауни дозволяє простежити ступінь екологічних змін. У низці досліджень [1–3] розглянуто загальні закономірності формування та функціонування ґрунтових угруповань, однак для умов Волино-Поділля регіональні особливості біомоніторингу досліджені обмежено. Недостатньо вивченими залишаються просторові відмінності у складі мезо- та макрофауни між природними і трансформованими екосистемами, а також вплив землекористування, сільськогосподарських практик та лісових дистурбансів на функціонування ґрунтових тварин [4].

Дослідження угруповань ґрунтової мезо- та макрофауни як індикаторів стану ґрунтового середовища створює можливість отримати об'єктивні дані про біорізноманіття та оцінити стійкість ландшафтів Волино-Поділля.

Актуальність дослідження. Зміни клімату та антропогенні дистурбанси (посухи, ерозійні процеси, інтенсивне землекористування, урбанізація) безпосередньо впливають на стан ґрунтових екосистем. Для об'єктивної оцінки цих впливів необхідно аналізувати угруповання ґрунтових тварин, які відображають рівень стабільності природних і трансформованих систем. Ґрунтова фауна бере участь у розкладі органічної речовини, регуляції кругообігу вуглецю та поживних елементів, що визначає хід основних процесів у ґрунтовому середовищі. Для Волино-Поділля, де поєднуються ділянки з відносно збереженими екосистемами та території з інтенсивним антропогенним використанням, вивчення складу й структури ґрунтових угруповань дозволяє встановити взаємозв'язок між режимом землекористування, кліматичними коливаннями та станом екологічних процесів.

Аналіз біорізноманіття і ролі ґрунтових тварин дає змогу оцінити рівень стійкості екосистем Волино-Поділля та окреслити напрями їхнього відновлення після зовнішніх впливів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження виконано в межах наукового напрямку, присвяченого біомоніторингу природних і антропогенних екосистем з використанням ґрунтових тварин. Робота спрямована на вирішення завдань, що стосуються визначення індикаторів стану ґрунтового середовища, аналізу впливу землекористування та кліматичних змін на угруповання ґрунтової фауни, а також розроблення підходів до збереження біорізноманіття в умовах антропогенного навантаження. Результати можуть застосовуватись у практиці природоохоронного планування та при розробленні

стратегій раціонального використання земельних ресурсів Волино-Поділля.

Метою даного дослідження є з'ясування складу та розподілу угруповань ґрунтових тварин у природних і антропогенних екосистемах Волино-Поділля залежно від типу землекористування та інтенсивності антропогенного навантаження, а також визначення можливостей їх використання як індикаторів для оцінки стану й стійкості екосистем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У звіті FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC [1] систематизовано сучасні знання про ґрунтове біорізноманіття та окреслено виклики для його збереження, підкреслюючи потребу уніфікованих методів біомоніторингу. Schön N. L., et al. [2] запропонували багатофункціональну класифікацію ґрунтових консументів від протистів до хребетних, що дозволяє більш комплексно аналізувати трофічні зв'язки. У іншій роботі Du Preez G., et al. [3] розробили єдину методичну основу для глобального моніторингу ґрунтових тварин, яка забезпечує порівнюваність результатів у різних біомах. Стандарт DIN EN ISO 23611-3 [4] регламентує процедури відбору та екстракції енхітреїд, що є базовим орієнтиром для лабораторних та польових робіт. У дослідженні Panagos P. et al. [5] обґрунтовано необхідність ухвалення Закону про моніторинг ґрунтів у ЄС, що визначає ключові індикатори та параметри їхнього контролю.

Сучасні молекулярні підходи значно розширили можливості біомоніторингу. Так, Xing K. et al. [6] застосували еДНК-аналіз для оцінки змін багаторівневого біорізноманіття в агроекосистемах. Steinke D. et al. [7] довели ефективність метабаркодингу членистоногих для виявлення видового складу та побудови екологічних мереж. Дослідження Köninger J. et al. [8] показало, що тип екосистеми є визначальним чинником формування складу та різноманіття ґрунтових еукаріотів у масштабах Європи. У сфері екотоксикології Swart E. et al. [9] здійснили мета-аналіз ген-експресійних біомаркерів у ґрунтових безхребетних і вказали на необхідність їхньої перевірки для широкого застосування в моніторингових дослідженнях. Узагальнюючий огляд Beaumelle L. et al. [10] систематизував вплив хімічних стресорів на ґрунтову фауну та окреслив напрями для майбутніх досліджень. В українському науковому контексті Гамкало З., Шпаківська І., Марискевич О. [11] розглянули особливості С-протекторної здатності ґрунтів Полісся, що безпосередньо пов'язано з процесами трансформації органічної речовини. Канарський Ю. та ін. [12] підготували рекомендації зі збереження біорізноманіття та рідкісних оселищ в умовах кліматичних змін, наголосивши на важливості інтеграції біомоніторингових даних у природоохоронну практику.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Територія Волино-Поділля поєд-

нує природні ландшафти та ділянки з інтенсивним антропогенним використанням, що створює умови для порівняльного аналізу стану ґрунтових угруповань. Проведення таких досліджень у сільсько-господарських угіддях чи на територіях із високим господарським навантаженням ускладнюється меліоративними роботами, застосуванням агрохімікатів і механічним обробитком ґрунту, які змінюють склад і чисельність безхребетних. На природоохоронних територіях, де господарська діяльність обмежена або заборонена, формуються більш стабільні угруповання ґрунтової фауни, що можуть використовуватися для визначення базових параметрів біорізноманіття. Ґрунтові тварини беруть участь у трансформації органічної речовини та створюють мікросередовища для розвитку мікроорганізмів. Швидкість і напрям цих процесів залежать від гідротопних умов та інтенсивності землекористування. Проте дані про вплив різних режимів господарського використання на структуру угруповань у Волино-Поділлі залишаються фрагментарними.

Глобальні кліматичні зміни впливають на процеси накопичення та мінералізації органічного вуглецю. Відомо, що ґрунтові тварини відіграють ключову роль у його депонуванні та вивільненні, проте кількісні оцінки цих процесів для екосистем регіону є обмеженими. Також бракує порівняльних досліджень, які б дозволили зіставити індикаторну роль ґрунтової фауни у природних та антропогенно трансформованих екосистемах.

Новизна. Вперше для території Волино-Поділлі здійснено комплексне порівняльне дослідження складу, чисельності та різноманіття ґрунтових мезо- і макрофауністичних угруповань у природних (лісових та лучних) і антропогенно трансформованих (агроугіддях, урбанізованих землях) екосистемах із використанням уніфікованих методів біомоніторингу. У роботі отримано нові кількісні дані щодо просторового розподілу основних таксонів ґрунтових тварин (*Collembola*, *Acari*, *Lumbricidae*, *Enchytraeidae*, *Isopoda*) та їхніх біоіндикаторних характеристик. Виявлено закономірності зміни структури та функціональної організації ґрунтових угруповань залежно від типу землекористування та рівня антропогенного навантаження. Також встановлено регіональні порогові значення біоіндикаторних показників (щільності, біомаси, індексу Шеннона) для оцінки стану та стійкості ґрунтових екосистем Волино-Поділлі. Отримані результати поглиблюють знання про механізми реакції ґрунтової фауни на дистурбанси і формують наукове підґрунтя для створення регіональної системи біомоніторингу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Робота розвиває концепцію використання ґрунтових тварин як інтегральних біоіндикаторів стану екосистем, що поєднує морфологічні, таксономічні та кількісні підходи у вивченні мезо- та макрофауни. Запропонована методика відбору й аналізу проб

ґрунтової фауни (моноліти, пастки Барбера, екстракція *Enchytraeidae*) є адаптованою до природно-кліматичних умов Волино-Поділлі і може бути використана як стандартна схема для подібних екологічних досліджень у регіонах із різним рівнем антропогенного впливу. Застосування кількісних показників (щільність, біомаса, видовий склад, H') у поєднанні з біотопічним аналізом дозволяє комплексно оцінювати екологічну стійкість ландшафтів та відстежувати деградаційні процеси у ґрунтовому середовищі. Розроблений підхід має міждисциплінарне значення для ґрунтознавства, екології, агроекології та природоохоронного планування, сприяючи формуванню науково обґрунтованої бази для управління земельними ресурсами й моніторингу стану біорізноманіття.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилися на ділянках природних і антропогенних екосистем Волино-Поділлі. Природні території були представлені листяними лісами та лучними угіддями, де ґрунтовий покрив зберігався у відносно стабільному стані. Антропогенно змінені ділянки включали рілля з інтенсивним землеробським використанням, меліоративні масиви та міські зелені зони. Такий добір ділянок дав змогу порівняти стан угруповань ґрунтових тварин у різних умовах землекористування.

Відбір матеріалу здійснювався за допомогою ґрунтових монолітів (25 × 25 см, глибина 10 см) та пасток Барбера, встановлених серіями по 10 одиниць на кожній ділянці. Усього було закладено 8 пробних площ: 4 на природних територіях і 4 на антропогенно трансформованих. За стандартною процедурою екстракції отримано 123 зразки ґрунтової мезофауни та макрофауни [1].

У природних екосистемах щільність ґрунтових безхребетних у верхньому горизонті (0–10 см) становила в середньому 1850 ± 75 екз./м², тоді як на орних землях цей показник знижувався майже вдвічі – до 920 ± 60 екз./м². Біомаса тварин у природних умовах сягала 14,3 г/м², а на антропогенних ділянках зменшувалася до 6,8 г/м². Найвищі значення видового різноманіття за індексом Шеннона ($H' = 2,85$) зафіксовано у лісових біотопах, тоді як на урбанізованих територіях індекс не перевищував 1,9.

Особливу увагу приділено енхітреїдам, чисельність яких у природних луках становила 420 ± 30 екз./м², тоді як у ріллі показник знижувався до 110 ± 20 екз./м². Колемболи були представлені 12 видами у лісах і лише 5 видами на агроугіддях. Ці відмінності демонструють чутливість ґрунтових тварин до рівня антропогенного навантаження й підтверджують їхню придатність для біоіндикації.

Отримані результати в таблиці 1 свідчать про чітку різницю між природними та антропогенними екосистемами Волино-Поділлі за основними біоіндикаторними показниками. У лісових ділянках щільність ґрунтових тварин становила 1850 екз./м², що є найвищим серед досліджених біотопів. Подібні зна-

чення фіксувалися й на лучних угіддях (1600 екз./м²), тоді як на агроугіддях та урбанізованих територіях показники знижувалися майже удвічі – до 920 та 780 екз./м² відповідно. Це відображає негативний вплив обробітку ґрунту, агрохімікатів і рекреаційного навантаження на стабільність безхребетних угруповань. Біомаса також суттєво варіювала: у лісах вона становила 14,3 г/м², на луках – 12,7 г/м², тоді як у ріллі та міських екосистемах знижувалася до 6,8 та 5,9 г/м². Таким чином, природні території утримують удвічі більший запас ґрунтової зоомаси порівняно з антропогенними. Видове різноманіття чітко відображає рівень антропогенного навантаження. У лісових угрупованнях зафіксовано 28 видів ґрунтових тварин з індексом Шеннона $H' = 2,85$, тоді як в урбанізованих умовах – лише 9 видів та $H' = 1,9$. Подібна тенденція простежується і для колембол: 12 видів у лісах, 10 у луках, проти 5 на агроугіддях і лише 4 у міських біотопах. Енхітреїди виявилися чутливими індикаторами: їх чисельність на луках сягала 420 екз./м², у лісах – 380 екз./м², тоді як у ріллі та урбанізованих ділянках вона знижувалася до 110 та 95 екз./м². Це підтверджує їхню придатність для оцінки деградаційних процесів у ґрунтах. Загалом, дані демонструють стабільність і високу продуктивність природних екосистем порівняно з трансформованими.

Аналіз угруповань ґрунтової фауни у природних та антропогенних екосистемах Волино-Поділля показав суттєві відмінності як у видовому складі, так і в таксономічній структурі. У лісових біотопах було зафіксовано 28 видів безхребетних, серед яких найбільшу частку становили колемболи (*Collembola*) та кліщі (*Acari*), що разом формували понад 45 % чисельності. Значну роль відігравали також енхітреїди (*Enchytraeidae*), які забезпечували стабільність процесів мінералізації органічної речовини. У лучних ділянках виявлено 22 види, із них переважали дощові черви (*Lumbricidae*) та колемболи, тоді як частка кліщів була дещо нижчою, ніж у лісах [2].

На агроугіддях видовий склад обмежувався 12 видами, серед яких домінували енхітреїди та окремі представники жуків-жужелиць (*Sarabidae*). Проте їхня чисельність була значно меншою, ніж у природних біотопах. Урбанізовані території вияви-

лися найбільш збідненими: тут зафіксовано лише 9 видів, серед яких переважали ізоподи (*Isopoda*) та окремі види колембол, тоді як популяції лямбрицид і енхітреїд були майже повністю редуковані.

Кількісні показники підтвердили цю тенденцію. У лісових екосистемах середня щільність мезо- та макрофауни досягала 1850 екз./м² при біомасі 14,3 г/м². Для луків відповідні значення становили 1600 екз./м² та 12,7 г/м². В агроугіддях щільність знижувалася до 920 екз./м² (6,8 г/м²), а на урбанізованих територіях – до 780 екз./м² (5,9 г/м²). Таким чином, природні угруповання зберігають удвічі вищі значення чисельності й біомаси порівняно з трансформованими. Домінування окремих таксонів також варіювало між біотопами. Якщо у природних екосистемах угруповання були збалансованими з кількома домінуючими групами (колемболи, кліщі, лямбрициди), то в антропогенних простежувалася спрощена структура з перевагою небагатьох видів. Це свідчить про деградацію трофічних ланцюгів і зниження екологічної стійкості систем із високим рівнем антропогенного впливу.

Рисунок 1 наочно відображає перехід від поліструктурних угруповань у природних екосистемах до спрощених систем у трансформованих, що є ознакою втрати екологічної стійкості. Порівняльна структура угруповань свідчить, що у природних екосистемах (ліси та луки) домінування ґрунтових тварин розподілене між кількома таксономічними групами, що формує більш збалансовану систему. Тут жодна група не займає абсолютного переважання, що свідчить про функціональну рівновагу між редуцентами, консументами та мікропаразитами. В агроугіддях структура має ознаки спрощення: різко зростає частка енхітреїд, тоді як більшість інших груп втрачають позиції. Така диспропорція вказує на зниження трофічного різноманіття й спрощення екологічних зв'язків. Найбільш однобічна картина зафіксована на урбанізованих територіях. Тут значну частку формують ізоподи та поодинокі види колембол, тоді як інші групи представлені в мінімальній кількості. Це демонструє тенденцію до заміщення складних природних угруповань кількома толерантними видами, здатними витримувати інтенсивне антропогенне навантаження.

Таблиця 1

Біоіндикаторні показники угруповань ґрунтових тварин у природних та антропогенних екосистемах Волино-Поділля

Тип екосистеми	Щільність, екз./м ²	Біомаса, г/м ²	Кількість видів	Індекс Шеннона (H')	Чисельність енхітреїд, екз./м ²	Кількість видів колембол
Лісові ділянки	1850	14,3	28	2,85	380	12
Лучні ділянки	1600	12,7	22	2,6	420	10
Агроугіддя	920	6,8	12	2,05	110	5
Урбанізовані території	780	5,9	9	1,9	95	4

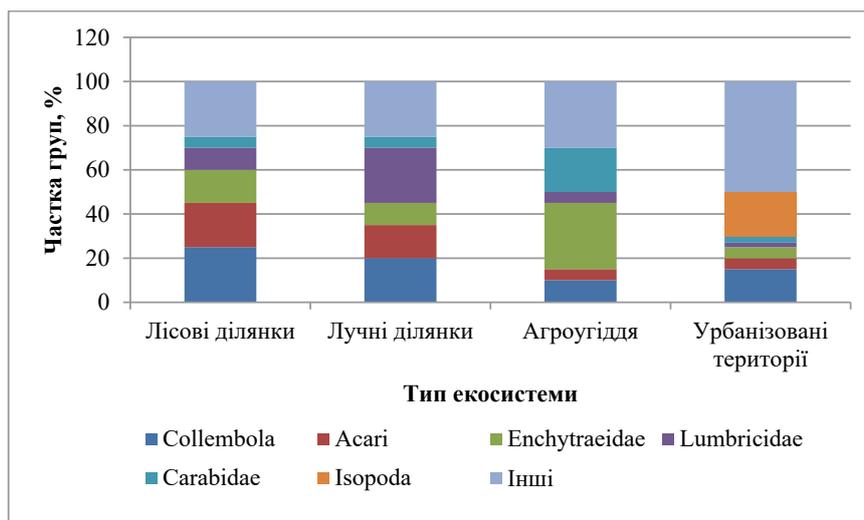


Рис. 1. Порівняльна структура угруповань ґрунтових тварин у природних та антропогенних екосистемах Волино-Поділля

Землекористування і урбанізація призвели до суттєвого спрощення структури ґрунтових угруповань. На орних землях зниження чисельності дощових черв'яків та колембол супроводжується зростанням частки енхітреїд, що є характерною реакцією на механічний обробіток і застосування агрохімікатів. Подібне домінування окремої групи відображає зменшення трофічної різноманітності та перерозподіл функціонального навантаження у системі. Урбанізовані ділянки відзначаються ще більшою редукацією таксонів: збережені лише кілька толерантних видів, здатних витримувати ущільнення ґрунту, забруднення та коливання вологості [3].

Наслідком цих змін є порушення екосистемних функцій. У природних лісах і луках ґрунтові тварини забезпечують рівномірний розклад органічної речовини, підтримують структуру ґрунту й сприяють формуванню стійких мікробних угруповань. У трансформованих екосистемах втрата видового різноманіття призводить до зменшення швидкості мінералізації та нерівномірного кругообігу поживних речовин. Це особливо помітно у зниженні ролі люмбрицидів, які у природних умовах відповідають за перемішування ґрунту й формування гумусових горизонтів.

Функціональне значення ґрунтових безхребетних простежується і в регуляції вуглецевого балансу. У лісових і лучних екосистемах різні трофічні групи підтримують стабільний процес депонування вуглецю за рахунок рівномірного розкладу органічної речовини та її включення у ґрунтовий профіль. В агроугіддях і урбанізованих територіях ці процеси послаблені, що збільшує ризик вивільнення вуглекислого газу та знижує здатність ґрунту функціонувати як довгострокове сховище органічного вуглецю.

Узагальнені результати таблиці 2 демонструють суттєві відмінності між природними та трансформованими екосистемами Волино-Поділля за всіма інте-

гральними показниками. Середня щільність угруповань у природних біотопах становила 1725 екз./м², що удвічі перевищує показник трансформованих територій (850 екз./м²). Аналогічна тенденція простежується й за біомасою: у природних екосистемах вона дорівнювала 13,5 г/м², тоді як в антропогенних – лише 6,4 г/м². Видове різноманіття також різко знижується під дією антропогенного навантаження. Якщо в лісах та на луках фіксувалося в середньому 25 видів ґрунтових тварин, то в агроугіддях і урбанізованих зонах – лише 10,5 виду. Це підтверджується значенням індексу Шеннона: у природних умовах він становив 2,7, що свідчить про більш рівномірний розподіл особин між видами, тоді як у трансформованих він знижувався до 2,0. Частка домінуючих груп у природних екосистемах обмежувалася 45 %, що вказує на збалансовану структуру з кількома рівнозначними таксонами. У трансформованих біотопах цей показник зростав до 65 %, що є свідченням різкого переважання небагатьох видів та спрощення трофічної структури. Дані інтегральних показників підтверджують, що антропогенне втручання знижує не лише чисельність і біомасу ґрунтових тварин, а й призводить до втрати різноманіття та посилення домінування окремих груп, що знижує екологічну стійкість екосистем.

Головні висновки. Результати дослідження показують, що склад і структура угруповань ґрунтових тварин Волино-Поділля різняться між природними та трансформованими екосистемами. У лісах і на луках зберігаються вищі показники щільності, біомаси та видового різноманіття, що характеризується більш рівномірним розподілом трофічних груп. В агроугіддях та урбанізованих територіях ці показники знижуються майже удвічі, домінування зосереджується в кількох таксонах, а структура угруповань спрощується. Отримані дані підтверджують при-

**Інтегральні біоіндикаторні показники ґрунтових тварин
у природних і трансформованих екосистемах**

Група екосистем	Середня щільність, екз./м ²	Середня біомаса, г/м ²	Середня кількість видів	Середній індекс Шеннона (H')	Частка домінуючих груп, %
Природні (ліси, луки)	1725	13,5	25	2,7	45
Трансформовані (агроугіддя, урбанізовані)	850	6,4	10,5	2	65

датність ґрунтових тварин як індикаторів стану екосистем та рівня антропогенного впливу. Зменшення їхнього різноманіття й біомаси відображає деградацію ґрунтового середовища та зниження його здатності до депонування вуглецю і підтримання родючості. Біоіндикаторні підходи на основі ґрунтової фауни дають змогу оцінювати стан екосистем і прогнозувати зміни їхньої стійкості під впливом кліматичних та антропогенних чинників.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективним напрямом продовження

роботи є порівняння функціональної ролі ґрунтових тварин у природних і трансформованих екосистемах з урахуванням просторово-часових змін кліматичних факторів. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на визначенні внеску окремих таксономічних груп у процеси депонування органічного вуглецю та відновлення родючості ґрунтів після антропогенного навантаження. Важливим завданням є також інтеграція біоіндикаторних показників у системи екологічного моніторингу регіону для прогнозування стійкості ландшафтів Волино-Поділля.

Література

1. FAO, ITPS, GSBI, SCBD and EC. State of knowledge of soil biodiversity: Status, challenges and potentialities. Rome: FAO, 2020. 618 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb1928en>
2. Schön N. L., Fraser P. M., Mackay A. D. Earthworms for inclusion as an indicator of soil biological health in New Zealand pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 2023. Vol. 66, № 3. P. 208–223. URL: <https://www.deepdyve.com/lp/taylor-francis/earthworms-for-inclusion-as-an-indicator-of-soil-biological-health-in-2gwm6Bv3Xv>
3. Du Preez G., Daneel M., de Goede R. G. M., et al. Nematode-based indices in soil ecology: Application, utility, and future directions. *Soil Biology and Biochemistry*. 2022. Vol. 169. P. 108640. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071722000979?via%3Dihub>
4. DIN EN ISO 23611-3:2020. Soil quality – Sampling of soil invertebrates – Part 3: Sampling and extraction of enchytraeids (ISO 23611). Berlin: Deutsches Institut für Normung (DIN), 2020. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/din/dineniso236112020>
5. Panagos P., Jones A., Lugato E., Ballabio C. A soil monitoring law for Europe. *Global Challenges*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/gch2.202400336>
6. Xing K., Lu W., Huang Q., Wu J., Shang H., Wang Q., Guo F., Du Q., Yin Z., Zhang Y., Li F. Soil eDNA biomonitoring reveals changes in multitrophic biodiversity and ecological health of agroecosystems. *Environmental Research*. 2024. № 262(Pt 2). P. 119931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119931>
7. Steinke D., Perez K. H. J., Prosser S. W. J., Sones J. E., Agda J. R. A., deWaard S. L., deWaard J. R., Zakharov E. V., Ratnasingham S., Hebert P. D. N., Fryxell J. Metabarcoding arthropods in agroecosystems in Southern Ontario, Canada. *Biodiversity Data Journal*. 2025. № 13. P. e158459. DOI: <https://doi.org/10.3897/BDJ.13.e158459>
8. Köninger J., Ballabio C., Panagos P., Jones A., Schmid M. W., Orgiazzi A., Briones M. J. I. Ecosystem type drives soil eukaryotic diversity and composition in Europe. *Global Change Biology*. 2023. № 29(10). P. 3063–3078. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16871>
9. Swart E., Martell E., Svendsen C., Spurgeon D. J. Soil ecotoxicology needs robust biomarkers: A meta-analysis approach to test the robustness of gene expression-based biomarkers for measuring chemical exposure effects in soil invertebrates. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 2022. № 41(9). P. 2124–2138. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.5402>
10. Beaumelle L., Thouvenot L., Hines J., Jochum M., Eisenhauer N., Phillips H. R. P. Soil fauna diversity and chemical stressors: A review of knowledge gaps and roadmap for future research. *Ecography*. 2021. № 44(6). P. 845–859. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.05627>
11. Гамкало З., Шпаківська І., Марискевич О. Особливості оцінки С-протекторної здатності ґрунтів силватизованих територій Полісся. Стан і біорізноманіття екосистем Шацького національного природного парку та інших природоохоронних територій: Матеріали конференції, присвяченої 100-річчю від дня народження К. А. Татарінова. Львів, 2021. С. 43–45. URL: https://www.researchgate.net/publication/354586220_OSOLIVOSTI_OCINKI_S-PROTEKTORNOI_ZDATNOSTI_GRUNTIV_SILVATIZOVANIH_TERRITORIJ_POLISSA_S43-45
12. Канарський Ю., Марискевич О., Андрєєва О., Кобів Ю., Микитчак Т. Збереження біорізноманіття і раритетних типів оселищ в умовах кліматичних змін. Наукові рекомендації. 2022. URL: <https://ecoinst.org.ua/pdf/zberzhennia-bioriznomanittia-recomendacii-2022.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 10.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ЕКОЛОГІЯ ТА ПОВОЄННИЙ РОЗВИТОК УКРАЇНИ

УДК 504.062:711.4(477)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.5-62.1.37>

СТРАТЕГІЧНА ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА – ДІЄВИЙ ІНСТРУМЕНТ У ПОВОЄННОМУ ВІДНОВЛЕННІ ГРОМАД

Гілета Л.А.

Відокремлений структурний підрозділ «Педагогічний фаховий коледж Львівського національного університету імені Івана Франка»
вул. Туган-Барановського, 7, 79000, м. Львів
ljuba.gileta@gmail.com

У статті розглянуто роль стратегічної екологічної оцінки як важливого інструменту у процесі повоєнного відновлення громад. Військові дії перетворюють територію України на зону екологічної катастрофи, тому вже зараз важливо працювати над Програмами повоєнного відновлення громад. Важливо, щоб території, які зазнали руйнувань, стали кращими версіями себе в довоєнний період, щоб відновлення було не тільки швидким, але й забезпечувало сталий розвиток.

Акцент зроблено на необхідності інтеграції екологічної складової у процес планування території та реалізації програм повоєнного відновлення громад, що сприятиме забезпеченню сталого відновлення та підвищенню якості життя населення. З цією метою, Україна з 2018 року активно впроваджує стратегічну екологічну оцінку документів державного планування.

Проаналізовано основні нормативно-правові засади застосування стратегічної екологічної оцінки та її значення як найбільш дієвого інструменту у повоєнному відновленні громад.

Обґрунтовано, що використання стратегічної екологічної оцінки у процесі підготовки програм повоєнного відновлення дозволяє не лише мінімізувати ризики для довкілля та здоров'я населення, але й створює умови для сталого розвитку територій, понівечених військовими діями. Адаже етапи проведення стратегічної екологічної оцінки вказують на те, що документи державного планування всебічно оцінюють відповідні фахівці, повідомляють про це громадськість, проводять моніторинг. Процедура стратегічної екологічної оцінки дає змогу попередити негативні екологічні наслідки, оцінити потенційний вплив на довкілля та здоров'я населення і забезпечити, щоб усі плани та програми розвитку відповідали вимогам природоохоронного законодавства та екологічної безпеки.

Відповідно, можемо стверджувати, що документ державного планування, який стосується повоєнного відновлення громад, після проходження процедури стратегічної екологічної оцінки відповідатиме нормам природоохоронного законодавства й враховуватиме екологічну складову. *Ключові слова:* стратегічна екологічна оцінка, повоєнне відновлення, сталий розвиток, території громад, екологічна безпека, стан довкілля та здоров'я населення.

Strategic environmental assessment – an effective tool in post-war reconstruction of communities. Gileta L.

The article examines the role of Strategic Environmental Assessment (SEA) as an essential tool in the post-war recovery of communities. Military actions are transforming the territory of Ukraine into a zone of environmental catastrophe; therefore, it is crucial to start working on post-war community recovery programs now. It is important that the territories affected by destruction become better versions of themselves compared to the pre-war period, ensuring that recovery is not only rapid but also supports sustainable development.

The focus is placed on the necessity of integrating the environmental component into territorial planning and the implementation of post-war community recovery programs, which will contribute to sustainable recovery and improvement of the population's quality of life. Since 2018, Ukraine has been actively implementing strategic environmental assessment of state planning documents.

The article analyzes the main legal and regulatory framework for the application of SEA and its significance as one of the most effective instruments in post-war recovery. It substantiates that the use of SEA in preparing post-war recovery programs not only minimizes environmental and public health risks but also creates conditions for the sustainable development of territories affected by military actions. The stages of SEA demonstrate that state planning documents undergo expert assessment, involve public participation, and ensure monitoring. This procedure makes it possible to prevent negative environmental impacts, evaluate potential effects on the environment and public health, and guarantee that all development plans and programs comply with environmental legislation and safety requirements.

Accordingly, it can be argued that state planning documents related to post-war community recovery, after undergoing the SEA procedure, will comply with environmental protection legislation and integrate the environmental component. *Key words:* Strategic Environmental Assessment (SEA), post-war recovery, sustainable development, local communities' territories, environmental security, environmental conditions and public health

Постановка проблеми. Військові дії, які тривають в Україні, перетворюють нашу територію на зону екологічної катастрофи. В громадах, осо-

бливо тих, що наближені до лінії фронту, зруйновано до 90% території. Постійні прильоти, дальні і ближні бої, замінування території призводять до

руйнування будівель та інфраструктури, й, в свою чергу – забруднення атмосферного повітря, водних і ґрунтових ресурсів, знищення біорізноманіття та екосистем. Внаслідок, маємо довгострокові катастрофічні наслідки для довкілля та здоров'я місцевих жителів, які необхідно вирішувати, зокрема через реалізацію програм повоєнного відновлення, для яких процедура стратегічної екологічної оцінки, зважаючи на її численні переваги не обов'язкова.

Актуальність теми дослідження. Окремі громади вже почали роботу програми повоєнного відновлення, міністерство розвитку громад та територій презентувало відповідну методику [3], а згідно Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо першочергових заходів реформування сфери містобудівної діяльності» програми, що стосуються повоєнного відновлення, зокрема Програма комплексного відновлення території територіальної громади (її частини) не підлягає стратегічній екологічній оцінці [5]. Відповідно, виникає необхідність аргументації важливості стратегічної екологічної оцінки для відповідних програм задля забезпечення засад сталого, екологічно безпечного відновлення та розвитку територій.

Аналіз останніх публікацій і досліджень. Питання стратегічної екологічної оцінки та її ролі у збереженні довкілля і забезпеченні сталого розвитку територій знайшло відображення у низці публікацій [1, 2, 4, 7]. Напрямок повоєнного відновлення, який покликаний в тому числі і для запобігання повторенню екологічних помилок та реалізації принципу «відбудувати краще, ніж було», є надзвичайно актуальним, проте залишається малодослідженим. Тому розгляд питання стратегічної екологічної оцінки як дієвого інструмента в повоєнному відновленні громад має значний потенціал.

Виклад основного матеріалу. Повоєнне відновлення території громад маємо розуміти не лише як відбудову зруйнованих будівель чи відновлення інфраструктури. Важливо, щоб відновлені громади стали кращими версіями себе в довоєнний період, щоб відновлення було не тільки швидким, але й стійким. Для цього необхідно дотримуватися принципів сталого розвитку і планувати відновлення з урахуванням не тільки економічного і соціального аспекту, а й екологічного компонента.

Однак розробляючи документи державного планування, в тому числі програми, що стосуються повоєнного відновлення, громади можуть зосереджуватися на економічному відновленні та досягненні короткотермінового добробуту, а екологічна складова може не отримувати належної уваги. Такі програми можуть не враховувати можливі екологічні ризики, які можуть виникнути внаслідок відновлення інфраструктури або використання природних ресурсів, що в перспективі може призвести до значних екологічних проблем.

Для вирішення подібних питань, Україна з 2018 року активно впроваджує стратегічну екологічну оцінку документів державного планування в рамках імплементації європейського природоохоронного законодавства. Однак, згідно національного законодавства, а саме Закону України «Про внесення змін до деяких законів України щодо першочергових заходів реформування сфери містобудівної діяльності», який був прийнятий 12.05.2022 року, програми, що стосуються повоєнного відновлення громад не підлягають процедурі СЕО, що зрештою негативно впливатиме на стан довкілля та здоров'я місцевого населення.

Діючий Закон України «Про стратегічну екологічну оцінку» [6] визначає, що органи місцевого самоврядування, зокрема голови сільських, селищних та міських рад, зобов'язані враховувати вимоги екологічного законодавства при плануванні розвитку своїх територій та здійснювати процедуру стратегічної екологічної оцінки. Таке визначення також «ідеально» підходило би при розробці програм для повоєнного відновлення громад.

Саме під час процедури СЕО, документ державного планування має пройти кілька етапів аналізу, щоб оцінити його відповідність нормам природоохоронного законодавства та забезпечити екологічну безпеку, зокрема під час визначення обсягу стратегічної екологічної оцінки й отриманні пропозицій щодо інформації, яку необхідно надати у звіті; власне під час складання звіту; під час проведення громадського обговорення та консультацій (в т. ч. транскордонних), де зацікавлені сторони можуть надавати коментарі та пропозиції щодо різних аспектів використання та оптимізації території; в процесі врахування звіту про стратегічну екологічну оцінку, результатів громадського обговорення та консультацій; інформування про затвердження документа державного планування; в процесі моніторингу наслідків виконання документа державного планування для довкілля, у тому числі для здоров'я населення.

Таким чином, етапи проведення стратегічної екологічної оцінки вказують на те, що документи державного планування, які пропонують затвердити, всебічно оцінюють відповідні фахівці, повідомляють про це громадськість, проводять відповідний моніторинг, й, відповідно, можемо стверджувати, що запропонований, можливо і не досконалий з точки зору природоохоронного законодавства документ повинен відповідати його нормам й враховувати екологічну складову, що є дуже важливим при поствоєнному відновленні громад.

Подальший аналіз процедури СЕО та її важливості у повоєнному відновленні громад приводить до необхідності аналізу процесу розроблення якісного Звіту про СЕО, де потрібно:

- описати зміст та основні цілі документа державного планування, його зв'язок з іншими відповідними документами;

- охарактеризувати поточний стан довкілля, у тому числі здоров'я населення, та прогнозні зміни цього стану, якщо документ державного планування не буде затверджено, а також стан довкілля, умови життєдіяльності населення та стану його здоров'я на територіях, які ймовірно зазнають впливу проектованої діяльності під час відновлення громад;

- описати екологічні проблеми, у тому числі ризики впливу на здоров'я населення на планованій території;

- описати зобов'язання у сфері охорони довкілля, у тому числі пов'язані із запобіганням негативному впливу на здоров'я населення, встановлені на міжнародному, державному та інших рівнях, що стосуються документа державного планування, а також шляхи врахування таких зобов'язань;

- описати наслідки для довкілля, у тому числі для здоров'я населення, у тому числі вторинні, кумулятивні, синергічні, коротко-, середньо- та довгострокові, постійні і тимчасові, позитивні і негативні;

- запропонувати та обґрунтувати вибір виправданих альтернатив, що розглядались;

- передбачити заходи для запобігання, зменшення та пом'якшення негативних наслідків виконання документа державного планування та заходи для здійснення моніторингу;

- описати ймовірні трансграничні наслідки.

Кожен з розділів Звіту про СЕО зобов'язує максимально всебічно вивчити документ державного планування, який передбачають затвердити, що було би особливо актуальним саме для програм, що стосуються повоєнного відновлення громад. Адже вони повинні відповідати програмам комплексного відновлення області, території територіальної громади (її частини), яка в свою чергу має сприяти впровадженню таких сучасних підходів та практик розвитку регіонів, територіальних громад, населених пунктів та частин їх територій, як людиноцентризм та соціальна справедливість, раціональне просторове планування, забезпечення балансу розселення та розміщення робочих місць, стала міська мобільність, інклюзивність, енергоефективність, екологічність, збереження культурного розмаїття та національної пам'яті, а також відповідати Цілям сталого розвитку України на період до 2030 року. Однак, без проведення СЕО неможливо буде визначити екологічність та інші запропоновані сучасні підходи та практики розвитку регіонів.

Під час розробки Звіту про СЕО необхідно, перш за все, проаналізувати документ державного планування, його зміст та цілі, його відповідність законодавству та зв'язок з іншими подібними документами. Такий аналіз програм, що стосуються повоєнного відновлення громад, для прикладу, дасть змогу оцінити напрацювання у відповідних програмах, визначити їх відповідність нормативно-правовим актам, планам та стратегіям. Тобто вимоги стратегічної екологічної оцінки дають змогу «в загальному» оцінити

відповідність документа державного планування існуючому законодавству, в тому числі природоохоронному, діючим планам та стратегіям.

Розробники Звіту про СЕО також повинні вивчити географічну та екологічну складову планованої території. Це особливо необхідно саме для громад, що потрапили під вплив військових дій. Адже саме ця територія стає зоною екологічного лиха, де усі компоненти довкілля зазнали впливу. В повітря через вибухи потрапила значна кількість забруднюючих речовин: оксиди азоту, вуглекислий газ, монооксид вуглецю, сажа та дрібнопрі частки, токсичні органічні сполуки, зокрема сполуки, що містять хлор або інші важкі метали, токсичні важкі метали, такі як свинець, кадмій та інші. Водні ресурси та ґрунти, окрім деяких з вище перелічених забруднювачів, також забруднені паливо-мастильними матеріалами, різноманітними відходами, продуктами розкладу біоти та ін. Біологічне та ландшафтне різноманіття залежно від інтенсивності бойових дій може зазнати практично повного знищення. Тому вивчення ступеня забруднення та трансформації території у зоні бойових дій є максимально актуальним перед та під час розробки програм для повоєнного відновлення громад. А проведення СЕО дає інформацію про поточний стан довкілля громади, який безпосередньо впливатиме на стан здоров'я місцевого населення.

Окрім цього, в процесі підготовки Звіту про СЕО його розробники, на основі відомостей про стан довкілля та наявні екологічні проблеми на території, зможуть спрогнозувати наслідки як короткострокові, так і довгострокові, вторинні, кумулятивні, синергічні, постійні і тимчасові, позитивні і негативні, що будуть викликані рішеннями, які прийняті, зокрема в програмі повоєнного відновлення. Тому включення фахівців-екологів в процес розробки програм, що стосуються повоєнного відновлення через процедуру СЕО матиме довгострокові позитивні наслідки для стану довкілля громади та здоров'я її мешканців.

Поряд з аналізом географічної та екологічної складової території, екологічних проблем та наслідків для довкілля, під час складання Звіту про СЕО, його розробники вивчають врахування екологічної складової документів державного планування, й описують зобов'язання у сфері охорони довкілля, у тому числі пов'язані із запобіганням негативному впливу на здоров'я населення, встановлені на міжнародному, державному та інших рівнях. Врахування екологічної складової в документі державного планування, а саме в програмі для повоєнного відновлення громад, яка відповідатиме програмам, затвердженим на міжнародному рівні, збільшить шанси для громад отримувати міжнародну допомогу на вирішення екологічних проблем (наприклад, для будівництва очисних споруд, оскільки проблема скидання неочищених чи недостатньо очищених стічних вод посідає чільне місце серед екологічних проблем на території України) чи долучення до екологічних ініціатив (роз-

виток альтернативних джерел енергії і т. д.). Окрім того, навряд чи без проведення SEO для програми, що стосується повоєнного відновлення громад міжнародні донори будуть працювати з громадами і долучатися до фінансування різноманітних проєктів. Таким чином, проведення SEO збільшує шанси громади на фінансування відновлення.

Якісна підготовка Звіту про SEO також вимагає запропонувати та обґрунтувати вибір виправданих альтернатив, що розглядалися. Така інформація найбільш точно може бути подана у випадку комунікації розробників Звіту про SEO та авторів програм для повоєнного відновлення громад. Це ще один з аргументів, що визначає стратегічну екологічну оцінку як дієвий інструмент у повоєнному відновленні громад. Адже якісна комунікація фахівців різних галузей завжди даватиме позитивні результати для фінальних редакцій проєктів, в нашому випадку для програми для повоєнного відновлення, й більш ймовірно включатиме більш екологічні рішення та враховуватиме екологічну складову.

Під час складання Звіту про SEO, необхідно також передбачити заходи для запобігання, зменшення та пом'якшення негативних наслідків виконання документа державного планування та заходи для здійснення моніторингу. Щодо заходів в природоохоронній сфері, то вважаємо необхідним, щоб їх перелік повинен бути присутній у програмах для повоєнного відновлення. Адже відновлювати маємо територію громади, яка зазнала наслідків війни, й відповідно складові доквілля якої сильно трансформовані (можливо, навіть, зруйновані). Тому без заходів для покращення стану компонентів природного середовища програма відновлення точно буде неповна і неспроможна виконати свої завдання. В цьому випадку SEO – буде як додатковий інструмент для покращення (розширення, удосконалення) запропонованих у програмі заходів. Щодо заходів моніторингу – тут важливо, що відповідальний підхід до здійснення процедури SEO та підготовки Звіту дасть змогу здійснювати контроль і моніторинг стану доквілля на кожному етапі повоєнного відновлення, а також після його реалізації. А у випадку результатів моніторингу, які не відповідатимуть заявленим показникам буде можливість терміново переглядати результати не затягуючи часу. Тому чітко прописані заходи, критерії та терміни моніторингу, які вимагає процедура SEO є важливими для програм повоєнного відновлення громад.

Процедура SEO вимагає також співпраці з зацікавленими сторонами при ймовірних транскордон-

них наслідках. Якщо цей механізм буде задіяний для громад, що межують із державами-партнерами – матимемо ще один привід для міжнародної співпраці і фінансової допомоги для відбудови громад. Відповідно, це також свідчить про те, що SEO є дієвим інструментом повоєнного відновлення.

Важливим етапом в процедурі SEO є також залучення громадськості до цього процесу, що дозволяє врахувати думки місцевих жителів та зацікавлених сторін і створити таку модель відновлення, яка буде підтримуватися на місцях. Адже, місцеві жителі часто мають цінний досвід і знання про екологічні проблеми своєї території, і їхня участь у процесі відновлення є важливим елементом успіху у відновленні громади.

Головні висновки. Стратегічна екологічна оцінка, є, мабуть, найбільш дієвим інструментом у повоєнному відновленні громад. Процес стратегічної екологічної оцінки дає змогу попередити негативні екологічні наслідки, оцінити потенційний вплив на природу від планованих проєктів і забезпечити, щоб усі плани та програми розвитку відповідали вимогам природоохоронного законодавства та екологічної безпеки, оскільки саме керівники громад мали б бути відповідальними за рішення, які пропонують програми повоєнного відновлення.

Окрім цього, пройшовши процедуру SEO, програми повоєнного відновлення громад стануть важливим кроком на шляху до побудови більш стійкого та екологічно чистого майбутнього. Залучення фахівців різних галузей значно покращить «якість програм», а інтеграція екоїдей та принципів сталого розвитку дозволить створювати ефективні, довготривалі рішення.

Громади отримають можливість не лише залучати міжнародну допомогу, а й активно брати участь у заходах, запропонованих у програмах, що сприятиме збереженню навколишнього середовища, розвитку зелених технологій та покращенню якості життя.

Таким чином, програми для повоєнного розвитку громад, що проходять стратегічну екологічну оцінку не тільки допоможуть відновити країну після війни, але й створять умови для сталого розвитку та процвітання в майбутньому.

Перспективи використання результатів досліджень. Результати дослідження мають на меті сприяти ефективному впровадженню процедури стратегічної екологічної оцінки в програми повоєнного відновлення територіальних. Це забезпечить покращення стану доквілля та здоров'я населення в довгостроковій перспективі.

Література

1. Гілета Л. А. Місце й суть стратегічної екологічної оцінки в територіальному плануванні населених пунктів. Науково-практичний журнал Зелена економіка. 2023. № 1. С. 128–143.
2. Гілета Л.А. Місце стратегічної екологічної оцінки в територіальному плануванні населених пунктів. Регіон – 2020: стратегія оптимального розвитку: матеріали міжнародної науковопрактичної конференції (м. Харків, 8–9 жовтня 2020 р.). Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2020. С. 132–134.

3. Методика розроблення програми комплексного відновлення території територіальної громади. URL: https://decentralization.ua/uploads/library/file/895/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%9F%D0%9A%D0%92.pdf
4. Козаченко Т.П. Стратегічна екологічна оцінка в Україні: проблеми та перспективи. Інвестиції: практика та досвід. 2018. № 16. С. 98–101.
5. Про внесення змін до деяких законів України щодо першочергових заходів реформування сфери містобудівної діяльності: Закон України від 17.01.2017 р. № 1817-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 9. Ст. 89.
6. Про стратегічну екологічну оцінку: Закон України від 20.03.2018 р. № 2354-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2018. № 16. Ст. 139.
7. Шевченко І.В. Стратегічна екологічна оцінка як інструмент екологічної політики України. Економіка України. 2016. № 10. С. 79–86.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Алпатова Оксана Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-0803-9850

Андріанова Тетяна Володимирівна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу мікології, Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного Національної академії наук України, orcid.org/0000-0002-9590-3231

Бабенко Володимир Миколайович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0002-1578-3445

Березовий Влас Романович (Богуслав) – магістр з технологій захисту навколишнього середовища, Національний університет харчових технологій, orcid.org/0009-0009-7294-1209

Білоконь Альона Олександрівна (Миколаїв) – кандидат історичних наук, експерт зі сталого розвитку і трансферу технологій, Регіональний акселераційний центр GСIP для інновацій, технологій та інноваційних стартапів у Миколаївській області, orcid.org/0000-0003-1644-4397

Боголюбов Володимир Миколайович (Київ) – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-5181-6892

Бондар Олександр Іванович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, академік Національної академії аграрних наук України, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-4488-2282

Бондар Тетяна Валеріївна (Харків) – доктор філософії, викладач кафедри української мови, психології та педагогіки, Харківський національний медичний університет, orcid.org/0000-0002-9487-5363

Бондар Тетяна Олексіївна (Харків) – учениця, Комунальний заклад «Харківський ліцей № 161 «Імпульс» Харківської міської ради», orcid.org/0009-0007-9443-8175

Бондарь Валерія Іванівна (Київ) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-8737-3568

Босюк Альона Сергіївна (Харків) – PhD, старша викладачка кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0001-5254-2272

Брановський Мар'ян Володимирович (Львів) – аспірант кафедри цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка», orcid.org/0009-0001-6434-8351

Бурко Вадим Анатолійович (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетики та захисту навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», директор, Інститут підвищення кваліфікації Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет», orcid.org/0000-0002-7384-4226

Бусленко Леся Володимирівна (Луцьк) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри зоології факультету біології та лісового господарства, Волинський національний університет імені Лесі Українки, orcid.org/0000-0002-4626-9019

Василенко Ольга Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0003-3283-6980

Войтенко Юлія Володимирівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпека життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0000-0003-0819-3794

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

Волочай Поліна Анатоліївна (Черкаси) – студентка II курсу магістратури факультету технологій, будівництва та раціонального природокористування, Черкаський державний технологічний університет, orcid.org/0009-0001-6490-723X

Волошин В'ячеслав Степанович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор кафедри теплоенергетики та захисту навколишнього середовища, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», orcid.org/0000-0002-9922-5618

Гаріджук Світлана Василівна (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0009-0000-2235-6292

Герасименко Микола Васильович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0009-0009-9991-1106

Герасимюк Павло Васильович (Чернівці) – аспірант кафедри екології та біомоніторингу, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, orcid.org/0009-0002-7837-0266

Гілета Любов Андріївна (Львів) – кандидат географічних наук, викладач-методист педагогічно-природничого відділення, Відокремлений структурний підрозділ «Педагогічний фаховий коледж Львівського національного університету імені Івана Франка», orcid.org/0000-0001-9483-8709

Давибіда Лідія Іванівна (Івано-Франківськ) – кандидат геологічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, orcid.org/0000-0002-9796-7124

Давидова Ірина Володимирівна (Житомир) – кандидат сільсько-господарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-6535-3948

Демчук Людмила Іванівна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-5698-7113

Долженкова Олена Вікторівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри безпека життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0000-0002-7970-8110

Єгорова Оксана В'ячеславівна (Черкаси) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Черкаський державний технологічний університет, orcid.org/0000-0002-7801-5582

Зеленчук Іван Дмитрович (Умань) – аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0009-0008-8517-6617

Золотько Олена Василівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпека життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0000-0003-2482-7574

Іващенко Тарас Григорович (Київ) – доктор технічних наук, керівник Центру екологічної оцінки та запобігання промислового забрудненню, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0001-6749-1009

Івусь Тетяна Ігорівна (Чернігів) – аспірант кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, orcid.org/0000-0002-6993-611X

Ілленко Володимир Віталійович (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-0058-0442

Ільїна Анна Олександрівна (Одеса) – доктор філософії з Наук про Землю, старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0003-4108-3239

Карпенко Юрій Олександрович (Чернігів) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри екології, географії та природокористування, Національний університет «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка, orcid.org/0000-0002-1703-8473

Кірейцева Ганна Вікторівна (Житомир) – кандидат економічних наук, доцент, доктор технічних наук, професор кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-1055-1784

Клепко Алла Володимирівна (Київ) – доктор біологічних наук, професор, завідувачка кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-3768-2397

Ковган Ярослав Олександрович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0009-0000-7691-7833

Коверсун Інна Вікторівна (Київ) – молодший науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-5484-4204

Корбут Марія Броніславівна (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, докторант, Національний університет «Львівська політехніка», orcid.org/0000-0003-2395-3456

Косарчук Ольга Вікторівна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-9669-1747

Крайнюков Олексій Миколайович (Харків) – доктор географічних наук, професор, професор кафедри екології та менеджменту довкілля, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, orcid.org/0000-0002-5264-3118

Крючкова Валерія Валеріївна (Харків) – аспірантка хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0009-0000-7548-6779

Курило Святослав Михайлович (Житомир) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0008-6138-8850

Лазарєв Дмитро Миколайович (Київ) – аспірант кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0009-0005-9785-6239

Лазарєв Микола Михайлович (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-6286-0063

Левчук Святослав Євлогієвич (Київ) – кандидат біологічних наук, провідний науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0001-5167-7773

Лучак Іван Петрович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0009-0008-8342-519X

Марфутін Анатолій Борисович (Львів) – аспірант кафедри цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка», orcid.org/0009-0009-5171-5974

Матухно Олена Вікторівна (Дніпро / Берлін) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»; науковий співробітник департаменту моніторингу, звітності та верифікації викидів у торгівлі викидами, Німецьке екологічне агентство (Umweltbundesamt), orcid.org/0000-0001-5536-6745

Миленька Мирослава Миронівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент, завідувач кафедри біології та екології, Карпатський національний університет імені Василя Стефаника, orcid.org/0000-0001-9249-8077

Мідик Світлана Вікторівна (Київ) – кандидат ветеринарних наук, старший дослідник, завідувач науково-дослідного відділу моніторингу безпеки продукції агропромислового комплексу Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-2682-2884

Морозова Тетяна Васиївна (Київ) – кандидат біологічних наук, доцент, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0003-4836-1035

Мохонько Вікторія Іванівна (Київ) – кандидат геологічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної інженерії та екології, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, orcid.org/0000-0002-4234-1757

Нагурський Олег Антонович (Львів) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цивільної безпеки, Національний університет «Львівська політехніка», orcid.org/0000-0002-5549-5296

Назаренко Діана Юліївна (Дніпро) – студентка IV курсу фізико-технічного факультету, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0009-0001-9540-0757

Назаренко Олексій Володимирович (Житомир) – студент II курсу факультету гірничої справи, природокористування та будівництва, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0005-5168-0098

Нечипоренко Дмитро Ігорович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0002-5570-1061

Новікова Анастасія Миколаївна (Харків) – аспірант кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, orcid.org/0000-0003-4063-0130

Панасюк Андрій Вікторович (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0001-7468-2022

Петровська Мирослава Андріївна (Львів) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0001-9427-7307

Петровський Святослав Володимирович (Львів) – аспірант кафедри маркетингу, Львівський національний університет імені Івана Франка, orcid.org/0000-0001-7794-6142

Печений Володимир Леонідович (Київ) – доктор філософії, керівник науково-дослідницької лабораторії, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0000-0002-3529-9394

Пічкур Тетяна Валеріївна (Київ) – кандидат історичних наук, доцент, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Навчально-науковий інститут залізничного транспорту Національного транспортного університету, orcid.org/0000-0002-5325-9679

Приходько Вероніка Юріївна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0003-3854-6693

Рекун Ігор Анатолійович (Житомир) – студент I курсу магістратури факультету гірничої справи, природокористування та будівництва, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0009-0009-3196-8069

Різничук Надія Іванівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, науковий куратор, Дендрологічний парк «Дружба» Карпатського національного університету імені Василя Стефаника, orcid.org/0000-0002-4863-6775

Родіонова Олена Володимирівна (Житомир) – студентка IV курсу природничого факультету, Житомирський державний університет імені Івана Франка, orcid.org/0009-0004-8998-4057

Русакова Тетяна Іванівна (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, orcid.org/0000-0001-5526-3578

Сакун Антоніна Олегівна (Харків) – доктор філософії, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0002-1079-7856

Самкова Оксана Петрівна (Київ) – старший науковий співробітник Української лабораторії якості і безпеки продукції агропромислового комплексу, Національний університет біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-2132-3357

Сапко Ольга Юріївна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент кафедри екологічного права і контролю, доцент кафедри екологічного права і контролю, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, orcid.org/0000-0003-2076-5361

Семко Кирил Вадимович (Харків) – здобувач, аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0001-8451-062X

Сонько Сергій Петрович (Умань) – доктор географічних наук, професор кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет, orcid.org/0000-0002-7080-9564

Теплюк Вадим Сергійович (Луцьк) – кандидат біологічних наук, доцент, доцент кафедри зоології факультету біології та лісового господарства, Волинський національний університет імені Лесі Українки, orcid.org/0000-0002-0611-2797

Увасва Олена Іванівна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри екології, Поліський національний університет, orcid.org/0000-0003-1894-0386

Федоряк Марія Михайлівна (Чернівці) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології та біомоніторингу, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, orcid.org/0000-0002-6200-1012

Харченко Вячеслав Валерійович (Київ) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, orcid.org/0000-0002-7300-4809

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

Хомутинін Юрій Володимирович (Київ) – доктор сільськогосподарських наук, головний науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології Національного університету біоресурсів і природокористування України, orcid.org/0000-0002-4205-4352

Хохлов Андрій Вікторович (Київ) – доктор технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу сорбції і тонкого неорганічного синтезу, Інститут сорбції та проблем ендоекології Національної академії наук України, orcid.org/0000-0001-5340-1869

Хохлова Людмила Йосипівна (Київ) – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу сорбції і тонкого неорганічного синтезу, Інститут сорбції та проблем ендоекології Національної академії наук України, orcid.org/0000-0002-2201-1312

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович (Житомир) – доктор філософії, в.о. завідувача кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0002-3240-8719

Чвартковська Анастасія Олександрівна (Херсон) – студентка II курсу магістратури факультету біології, географії та екології, Херсонський державний університет, orcid.org/0009-0000-0913-1216

Чиж Ольга Василівна (Київ) – аспірант відділу природної флори, Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України, orcid.org/0009-0006-0996-5986

Шахман Ірина Олександрівна (Херсон) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри географії та екології, Херсонський державний університет, orcid.org/0000-0001-6204-4410

Шевчук Лариса Миколаївна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка», orcid.org/0000-0003-4164-514X

Шестопалов Олексій Валерійович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», orcid.org/0000-0001-6268-8638

Щокіна Марина Миколаївна (Харків) – аспірантка кафедри екології та менеджменту довкілля, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, orcid.org/0009-0003-2313-4036

Яковлев Ігор Олегович (Київ) – аспірант, Державна наукова установа «Інститут екологічного відновлення та розвитку України», orcid.org/0009-00005-7162-4981

Наукове видання

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

5(62) ЧАСТИНА 1

- **Екологія та економіка природокористування**
- **Екологія водних ресурсів**
- **Екологія землекористування**
- **Екологія і транспорт**
- **Екологія і будівництво**
- **Екологія і виробництво**
- **Екологія природних ресурсів**
- **Агроекологія**
- **Екологічний моніторинг**
- **Екологія і туристична сфера**
- **Екологічні питання в контексті євроінтеграції України**
- **Екологія біорізноманіття**
- **Екологія та повоєнний розвиток України**

Адреса редакції:

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
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

Підписано до друку 15.12.2025. Формат 64x84/8.

Папір офсетний. Гарнітура Times New Roman. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 35,81. Тираж 100. Замовлення № 1025/809.
Ціна договірна. Віддруковано з готового оригінал-макета