

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

4(61)



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Екологічні науки : науково-практичний журнал / Головний редактор Бондар О.І. – К. :
Видавничий дім «Гельветика», 2025. – № 4(61). – 308 с.

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

Заступник головного редактора: Нагорнева Н.А.

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

Відповідальний редактор: Сікачина В.Г.

Редакційна колегія:

Єрмаков В.М., доктор технічних наук

Іващенко Т.Г., кандидат технічних наук

Коніщук В.В., доктор біологічних наук

Лукаш О.В., доктор біологічних наук

Машков В.А., доктор технічних наук

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](https://www.strikeplagiarism.com) від польської компанії [Plagiat.pl](https://www.plagiat.pl).

*Журнал включено до міжнародної наукометричної бази [Index Copernicus International](https://www.indexcopernicus.com)
(Республіка Польща)*

ЗМІСТ

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ	9
Бондар О.І., Артющин Л.М., Машков О.А. Адаптація принципів керування «розумними» бомбами для вирішення завдань екологічної безпеки України в умовах надзвичайних ситуацій.....	9
ТЕОРЕТИЧНА ЕКОЛОГІЯ	17
Іваненко М.К., Притула Н.М. Критичний аналіз методології розрахунку комплексного індексу забруднення атмосфери та напрями його вдосконалення в Україні.....	17
Літвак О.А. Формування соціально-екологічної відповідальності молоді при реалізації концепції STEM-освіти....	21
Муха Р.Б., Гнєзділова В.І. Цифрова екологія: міждисциплінарне осмислення об'єкта, предмета і методології.....	28
Сакун А.О., Єрмаков Ю.Ю. Сучасні методологічні підходи до оцінки екологічного стану рекреаційних зон.....	34
Тихомирова Т.С., Босюк А.С., Шестопалов О.В., Новожилова Т.Б., Філенко О.М. Особливості викладання основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей.....	38
АГРОЕКОЛОГІЯ	44
Войтків П.С., Іванов Є.А., Шмалій Ю.Ю. Сучасний стан земельних ресурсів Рава-руської територіальної громади Львівської області.....	44
РАДІОЕКОЛОГІЯ	52
Парахненко В.Г., Гончарук В.В., Мандебура С.В. Природоохоронне законодавство як інструмент регулювання техногенних загроз у сфері радіоекології.....	52
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА	57
Кочанов Е.О., Некос А.Н., Безсонний В.Л. Математичне моделювання хімічного зараження для оцінки екологічної небезпеки на хімічно небезпечних об'єктах.....	57
Крайнюков О.М., Проненко М.О. Впровадження системи біотестів для екотоксикологічної оцінки небезпечних властивостей відходів.....	63
Radomska M.M., Klymenko N.A. Drivers of fast fashion consumption practices and ecological footprint growth.....	68
Харченко В.В. Метеоумови середовища як складова оцінки ефективності Каховського водосховища.....	74
Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Вовк В.М., Хамдош І.Н. Еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах в умовах зростаючого антропогенного навантаження.....	78
ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ	85
Бойко О.В., Лук'янова В.В., Дерман В.А., Туцький Д.Г., Сорочинська О.Л. Результати еколого-геохімічного моніторингу забруднення ґрунтів важкими металами в районі розташування піскових майданчиків Бортницької станції аерації.....	85
Khabarova H., Kovalenko G., Barbashev S. State and prospects of using remote air monitoring methods in Ukraine....	92
ЕКОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА	98
Белоконь К.В. Розробка системи каталітичного очищення технологічних газів агломераційного виробництва від сірчистого ангідриду.....	98
Владимиров Р.В. Роль моделей пасток у вирішенні завдань сучасної нафтогазової геології.....	105
Коваленко Ю.Л., Дмитренко Т.В. Врахування життєвого циклу теплоізоляційних матеріалів в оцінці впливу на довкілля технологій утеплення будівель.....	110
Хом'як І.В., Василенко О.М. Фітоценотичне різноманіття в районі полігону твердих побутових відходів м. Коростень.....	117

Яковишина Т.Ф., Москальов М.О. Екологічна оцінка руйнівного впливу будівельної діяльності на ґрунти урбоекосистем	122
Яненко В.С., Клепко А.В. Моніторинг біорізноманіття та шумового навантаження в межах Овідіопольської вітроелектростанції.....	127
ЕКОЛОГІЯ ВОДНИХ РЕСУРСІВ.....	135
Валерко Р.А., Бондарчук В.М., Герасимчук Л.О. Кореляційний аналіз показників складу кар'єрних вод у контексті оцінки антропогенного навантаження на річкові екосистеми.....	135
Єрух М.М., Маренков О.М. Перебіг оогенезу гірчака європейського <i>Rhodeus amarus</i> (Bloch, 1782) Запорізького (Дніпровського) водосховища.....	141
Ліненко Є.О., Нечипоренко Д.І., Шкоп А.О., Ліфер В.Є. Комплексний аналіз способів очищення стічних вод забруднених нафтопродуктами.....	151
Середа Т.М., Мантурова О.В., Афанасьєв С.О. Зміни структурних показників фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон після руйнування греблі Каховської ГЕС.....	156
Степова О.В., Тягній Л.М. Оцінка альгоіндикаційним методом впливу біогенних елементів в річці Ворскла.....	162
Яковлев В.В., Дмитренко Т.В. Деякі особливості нітратного забруднення джерел децентралізованого водопостачання в зоні антропогенного впливу.....	168
ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ.....	177
Шарий Г.І., Козлов В.В. Екологічна та оборонна стійкість: нова парадигма для прифронтових територій України.....	177
ЕКОЛОГІЯ І КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ.....	182
Нікітіна О.В., Лемешко В.В. Вплив кліматичних змін на динаміку природних біотопів у геосистемі річки Південний Буг.....	182
Хандогіна О.В., Дядін Д.В., Дрозд О.М. Просторова оцінка вразливості дергачівської громади до екстремальних температур і посух в умовах зміни клімату.....	186
ЕКОЛОГІЯ І ДЕМОГРАФІЯ.....	197
Грабко Н.В., Колісник А.В., Чернякова О.І., Романчук М.Є., Вовкодав Г.М. Оцінка ризиків, пов'язаних із демографічними втратами населення України.....	197
ЗМІНА КЛІМАТУ.....	206
Герасимчук О.Л., Кагукіна А.М., Шевчук Л.М., Підвисоцький В.Т. Стан ґрунтових ресурсів Житомирщини в контексті кліматичних змін.....	206
ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ.....	212
Чугай А.В., Шапочка М.О. Огляд методичних підходів до оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн	212
ПИТАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ.....	216
Самойленко Н.М., Новожилова Т.Б., Шестопапов О.В., Чікірякін К.В., Титаренко А.І. Підвищення якості підготовки екологів у питаннях управління у природоохоронній діяльності та екологічної безпеки.....	216
Цопа В.А., Чеберячко Ю.І., Борисовська О.О., Дерюгін О.В., Чеберячко Л.М. Вдосконалення системи екологічного менеджменту згідно серій стандартів ISO 14000, ISO 31000, ISO 19011.....	221
ПИТАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....	233
Бойчук В.Б., Різничук Н.І. Сучасний стан озеленення міста івано-франківськ у контексті екологічної сталості: проблеми, виклики та стратегічні напрями розвитку.....	233

Коробчук Л.І. Розвиток урбанізації та виклики екології людини: шляхи забезпечення сталого розвитку екоуправління українських міст поєнного періоду.....	237
Yakymenko I., Madzhd S., Salavor O., Nychyk O., Shapovalov Ye., Hrehirchak N., Giritch A. European Union academic project management in sustainable development for Ukrainian students.....	242
ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ.....	246
Гончарук В. В., Парахненко В. Г. Оцінка ефективності природоохоронного інспектування у контексті стійкості ландшафтів до техногенного навантаження.....	246
Любінська Л.Г., Колодій В.А., Григорчук І.Д., Любинський О.І., Горішний М.Л., Власов І.Г., Пакуляк А.Ю. Біологічні ресурси роду глоду (<i>Crataegus</i>) в умовах Староушицької територіальної громади в межах НПП «Подільські Товтри».....	252
Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Курбет Т.В., Іванюк Р.О., Кагукіна А.М. Збереження біологічного різноманіття на природоохоронних територіях у межах лісових екосистемах.....	256
Яцемірська Н.П. Екологічний моніторинг річки смотрич для забезпечення екологічної рівноваги та сталого природокористування в умовах НПП «Подільські Товтри».....	265
УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ.....	270
Волошин В.С., Бурко В.А. Щодо питання про другий достатній показник у методології мінімізації промислових відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі.....	270
Гетта А.А., Ковров О.С. Сучасні вермікомпостери їхні переваги та недоліки.....	277
Кожемякін Г.Б., Прутцьков Д.В., Белоконь К.В., Румянцев В.Р., Бендюг В.І. Принципи створення регіональної стратегії управління відходами та шляхи її реалізації.....	285
Панас Н.Є. Екологічна оцінка впливу способів поводження з відходами на довкілля.....	290
Приходько В.Ю. Ресурсний потенціал залишкових фракцій з твердих побутових відходів.....	295
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	301

CONTENTS

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF ENVIRONMENTAL PROTECTION	9
Bondar O., Artyushyn L., Mashkov O. Adaptation of principles of control of «smart» bombs to solving the tasks of ecological security of Ukraine in emergency situations.....	9
THEORETICAL ECOLOGY	17
Ivanenko M., Prytula N. Critical analysis of the methodology for calculating the Complex Air Pollution Index and directions for its improvement in Ukraine.....	17
Litvak O. Formation of youth's socio-ecological responsibility through the implementation of STEM education concept....	21
Mukha R. Gniezdilova V. Digital ecology: an interdisciplinary reflection on its object, subject and methodology.....	28
Sakun A., Yermakov Yu. Modern methodological approaches to assessing the environmental condition of recreational areas.....	34
Tykhomyrova T., Bosiuk A., Shestopalov O., Novozhylova T., Filenko O. Features of teaching grantwriting basics to students in environmental specialties.....	38
AGROECOLOGY	44
Voitkiv P., Ivanov Ye., Shmaliy Yu. The current state of land resources of the Rava-Ruska territorial community of Lviv region.....	44
RADIOECOLOGY	52
Parakhnenko V., Goncharuk V. Environmental legislation as a tool for regulating technological hazards in the field of radioecology.....	52
ENVIRONMENTAL SAFETY	57
Kochanov O., Nekos A., Bezsoonyi V. Mathematical modeling of chemical contamination for environmental hazard assessment at hazardous chemical facilities.....	57
Krainiukov O., Pronenko M. Implementation of a biotesting system for ecotoxicological assessment of hazardous properties of wastes.....	63
Radomska M.M., Klymenko N.A. Drivers of fast fashion consumption practices and ecological footprint growth.....	68
Kharchenko V. Environmental meteorological conditions as a component of assessing the efficiency of the Kakhovka reservoir.....	74
Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Vovk V., Khamdosh I. Evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms in wetland ecosystems under increasing anthropogenic pressure.....	78
ENVIRONMENTAL MONITORING	85
Boiko O., Lukianova V., Derman V., Tutsyki D., Sorochynska O. Results of ecological and geochemical monitoring of soil contamination with heavy metals in the area of sand sites of bortnychi aeration station.....	85
Khabarova H., Kovalenko G., Barbashev S. State and prospects of using remote air monitoring methods in Ukraine....	92
ECOLOGY OF PRODUCTION	98
Belokon K. Development of a system of catalytic purification of technological gases of agglomeration production from sulfur dioxide.....	98
Vladimirov R. The role trap models in solving problems of modern oil and gas geology.....	105
Kovalenko Yu., Dmytrenko T. Consideration of the life cycle of thermal insulation materials in the environmental impact assessment of building insulation technologies.....	110
Khomiak I., Vasylenko O. Phytocenotic diversity in the area of the solid waste landfill of the Korosten.....	117
Yakovyshyna T., Moskalov M. Ecological assessment of the destructive impact of the construction activities to the urban ecosystems soils.....	122

Yanenko V., Klepko A. Monitoring of biodiversity and noise pollution within the Ovidiopol wind power plant.....	127
ECOLOGY OF WATER RESOURCES.....	135
Valerko R., Bondarchuk V., Herasymchuk L. Correlation Analysis of Quarry Water Composition Indicators in the Context of Assessing Anthropogenic Pressure on River Ecosystems.....	135
Yerukh M., Marenkov O. <i>The European bitterling</i> Rhodeus amarus (Bloch, 1782) oogenesis dynamic in the Zaporizke (Dniprovskie) Reservoir.....	141
Linenko Ye., Nechyporenko D., Shkop A., Lifer V. Comprehensive analysis of methods for treating wastewater contaminated with petroleum products.....	151
Sereda T., Manturova O., Afanasyev S. Changes in structural indicators of dneiper phytoplankton nearby the Kherson city after the demolition of the Kakhovskia hydropower plant DAM.....	156
Stepova O., Tiahnii L. Assessment of the impact of biogenic elements in the Vorskla River using the algoindication method.....	162
Yakovlev V., Dmytrenko T. Some Features and Characteristics of Nitrate Pollution of Decentralised Water Supply Sources in the Areas of Man-Caused Impact.....	168
ENVIRONMENTAL IMPLICATION OF MILITARY ACTIONS.....	177
Sharyi G., Kozlov V. Environmental and Military Resilience: A New Paradigm for Ukraine's Frontline Territories.....	177
ECOLOGY AND CLIMATE CHANGE.....	182
Nikitina O., Lemeshko V. The impact of climate change on the dynamics of natural biotopes in the geosystem of the Southern Bug river.....	182
Khandogina O., Diadin D., Drozd O. Spatial Assessment of the Vulnerability of the Derhachi Community to Extreme Temperatures and Drought under Climate Change Conditions.....	186
ECOLOGY AND DEMOGRAPHY.....	197
Hrabko N., Kolisnyk A., Chernyakova O., Romanchuk M., Vovkodav G. Assessment of risks associated with demographic losses of the population of Ukraine.....	197
CLIMATE CHANGE.....	206
Herasymchuk O., Kagukina A. The state of soil resources in the zhytomyr region in the context of climate change.....	206
GENERAL ENVIRONMENTAL SAFETY ISSUES.....	212
Chugai A., Shapochka M. Review of methodological approaches to assessing the technogenic load on the air basin.....	212
ENVIRONMENTAL MANAGEMENT ISSUES.....	216
Samoilenko N., Novozhylova T., Shestopalov O.V., Chikiriakin K. Improving the quality of environmentalists' training in management disciplines related to environmental protection and ecological safety.	216
Cheberichko Yu., Borisovska O., Deryugin O., Cheberichko L. Improvement of the environmental management system in accordance with the ISO 14000, ISO 31000, ISO 19011 standards. Tsopa V.A.,.....	221
SUSTAINABLE DEVELOPMENT ISSUES.....	233
Boichuk V., Riznychuk N. The current state of urban greening in Ivano-Frankivsk in the context of ecological sustainability: problems, challenges and strategic development directions.....	233
Korobchuk L. Development of urbanization and challenges of human ecology: ways of ensuring sustainable development of eco-management of Ukrainian cities during the war period.....	237
Yakymenko I., Madzhd S., Salavor O., Nychyk O., Shapovalov Ye., Hrehirchak N., Giritch A. European Union academic project management in sustainable development for Ukrainian students.....	242

PRESERVATION OF BIOLOGICAL AND LANDSCAPE DIVERSITY.....	246
Parakhnenko V., Goncharuk V. Assessment of the effectiveness of environmental inspection in the context of landscape resilience to technological loads.....	246
Lyubinska L., Kolodiy V., Hryhorchuk I., Liubinskyi O., Horishny M., Vlasov S., Pakulyak A. Biological resources of the Crataegus in the conditions of the Staroushytsky territorial community of the NPP “Podilsky Tovtry”.....	252
Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Kurbet T., Ivaniuk R., Kahukina A. Biodiversity conservation in protected areas within forest ecosystems.....	256
Yatsemirska N. Ecological monitoring of the smotrych river to ensure ecological balance and sustainable nature use in the conditions of the nnp «Podil’ski Tovtry».....	265
WASTE MANAGEMENT.....	270
Voloshyn V., Burko V. Additional energy conditions within the principle of thermodynamic duality as a mechanism for creating industrial waste and their minimization in the technological process.....	270
Hetta A., Kovrov O. Modern vermicomposters, their advantages and disadvantages.....	277
Kozhemiakin G., Pruttskov D., Belokon K., Rumiantsev V., Bendiuh V. Principles of Developing a Regional Waste Management Strategy and Pathways for Effective Implementation.....	285
Panas N. Ecological assessment of the impact of waste management methods on the environment.....	290
Prykhodko V. Resource potential of residues from municipal solid waste.....	295
AUTHORS’ CREDENTIALS.....	301

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СФЕРІ ЗАХИСТУ ДОВКІЛЛЯ

УДК 504:3703; 502; 541;553

АДАПТАЦІЯ ПРИНЦИПІВ КЕРУВАННЯ «РОЗУМНИМИ» БОМБАМИ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Бондар О.І., Артюшин Л.М., Машков О.А.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, 03035, м. Київ
dei2005@ukr.net, mashkov_oleg_52@ukr.net

Розглянуті питання застосування «розумних» бомб з алгоритмом керування на основі використання методу обернених (зворотних) задач динаміки. Обґрунтовано механізм його застосування для створення «розумних» бомб з метою вирішення завдань із захисту довкілля та природних ресурсів України. Під час дослідження використовувалася сукупність наукових методів теорії автоматичного керування, теоретичної механіки та інформаційних технологій при обґрунтуванні можливості створення та використання «розумних» бомб. Окреслено напрямки «цивільного» застосування «розумних» бомб, означені їхні основні характеристики. Розглянуті етичні та правові аспекти використання, а також майбутнє таких боєприпасів, характерні особливості вжиття методу обернених задач динаміки під час їх створення та застосування. Здійснено формалізацію задачі дотримання заданої траєкторії руху «розумної» бомби (стабілізації програмного руху; термінального керування; адаптивного стеження). Запропонована структурна схема алгоритму керування «розумною» бомбою.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні алгоритмів керування «розумними» бомбами різного практичного призначення із заданими динамічними властивостями на основі вирішення зворотних задач динаміки. Доцільно також розглядати процеси керування такими боєприпасами в стохастичній обстановці під час стабілізації «розумної» бомби на оперативній, програмованій траєкторії на основі рішення оберненої (зворотної) задачі динаміки, що забезпечує підвищення точності ураження та ефективності застосування «розумних» бомб.

Метод обернених завдань динаміки (МОБЗД) – потужний інструмент для вирішення задач управління рухом та оптимізації траєкторій, у тому числі й застосування до динаміки «розумних» бомб. Поліноміальне завдання траєкторії дозволяє зручно описувати різні аспекти руху з використанням поліноміальних функцій. У цьому контексті розглянута можливість застосування МОБЗД з поліноміальним поданням для вирішення різних завдань. *Ключові слова:* алгоритм керування, екологія в умовах війни, засоби пожежогасіння, захист довкілля та природних ресурсів, метод обернених (зворотних) задач динаміки, надзвичайна ситуація, «розумна» бомба.

Adaptation of principles of control of «smart» bombs to solving the tasks of ecological security of ukraine in emergency situations. Bondar O., Artyushyn L., Mashkov O.

The article considers the issue of using smart bombs with a control algorithm based on the use of the method of inverse (inverse) dynamics problems. The mechanism of using the method of inverse dynamics problems for the creation and use of smart bombs for solving the tasks of protecting the environment and natural resources of Ukraine is substantiated. During the study, a set of scientific methods of the theory of automatic control, theoretical mechanics and information technologies was used to substantiate the possibility of creating and using smart bombs. An assessment of the directions of “civilian” use of “smart” bombs is provided, the main characteristics of a smart bomb are determined. The issue of using smart bombs, ethical and legal aspects of using smart bombs, as well as the future of smart bombs are considered. The features of using the method of inverse dynamics problems in creating and using smart bombs are considered. The task of implementing a given trajectory of movement of a smart bomb is formalized (the task of stabilizing program movement; the task of terminal control; the task of adaptive tracking). A structural diagram of the smart bomb control algorithm is proposed. Prospects for further research are in the development of control algorithms for various practical purposes with specified dynamic properties based on the solution of inverse dynamics problems. It is also desirable to consider the processes of control of the SB in a stochastic formulation when stabilizing the SB on an operationally programmed trajectory based on the solution of the inverse (inverse) dynamics problem, which ensures an increase in the accuracy of destruction and the effectiveness of the use of smart bombs. *Key words:* control algorithm, ecology in war conditions, fire extinguishing means, protection of the environment and natural resources, the method of inverse (inverse) dynamics problems, emergency situation, smart bomb.

Постановка проблеми. Керовані проникаючі бомби (англ. Guided Penetration Bomb, скор. GPB), а також керовані авіаційні бомби (КАБ), в англійській літературі їх ще називають «розумні» бомби

(англ. smart bomb), – це авіаційні бомби, оснащені системою наведення та комплектом рульових поверхонь для точного ураження важливих цілей. Такі бомби мають велику проникаючу здатність для

ураження зсередини, забезпечуючи таким чином потужну вражаючу дію, значно сильнішу, ніж від звичайної бомби, що вільно падає. Однак зважаючи на те, що бомба призначена для поразки цілей зсередини, її зона ураження незначна і менша ніж від звичайної бомби, що вільно падає [13-14]. КАБ забезпечені системою управління і наведення. Деякі моделі КАБ оснащуються також невеликими ракетними двигунами, що підвищує дальність і поліпшує керованість польотом [3, 4, 7, 13].

З метою перетворення так званих «тупих» бомб вільного падіння на «розумні» кориговані, розроблюються відповідні комплекти додаткового обладнання, наприклад, AASM Hammer. Базові версії AASM Hammer використовують авіабомби на 250 і 1000 кг (в основі бомби Mk 82 і Mk 84/ BLU109 відповідно). Існують також версії на 125 та 500 кг. Завдяки модульній конструкції можна змінювати характеристики бомби в залежності від типів мети та характеру бойового завдання. Можна програмувати висоту підриву, швидкість та кут руху. Виробником такої технології виступає французька компанія Safran Electronics Defense, Франція. На озброєнні AASM Hammer використовується з 2007 року. У французьких Повітряних силах такі боєприпаси пристосовані для використання літаками Mirage 2000D, Dassault Rafale, Tejas, F-16 та Mirage F1. У Повітряних силах ЗСУ вони адаптовані для пусків з українських літаків МіГ-29 та Су-24М. Дальність таких бомб становить близько 70 км. Імовірно відхилення – близько 10 м.

Автори мають багаторічний досвід реалізації (МОБЗД) під час вирішення задач синтезу систем управління рухомими об'єктами та ставлять за мету аргументувати доцільність розширення його можливостей [1, 2, 5, 6, 7].

У цьому контексті можна розглянути можливість застосування МОБЗД з поліноміальним поданням для вирішення різних завдань. Тому важливо сформулювати методологію застосування «розумних» бомб з використанням методу обернених задач динаміки для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України [1-5, 9, 10].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження з питань застосування «розумних» бомб з використанням методу обернених задач динаміки для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України здійснювалися українськими та іноземними фахівцями і вченими, що підтверджується відповідними публікаціями [12-13].

Дж. Р. Вінсент (J. R. Vincent) запропонував застосовувати методи оптимізації та динамічного програмування в аерокосмічній інженерії, включаючи МОБЗД для завдань управління польотом. У працях Д. С. Фостер (D. S. Foster) проведені дослідження щодо застосування МОБЗД у робототехніці та управлінні рухом, включаючи різні уявні траєкто-

рій. У дослідженнях А.Б. Шмідта (A. B. Schmidt) (Німеччина) проведено моделюванням траєкторій з використанням поліноміального уявлення для оптимізації управління рухом літальних апаратів. І.П. Рінк (I. P. Rink) (Франція), досліджуючи питання застосування МОБЗД у системах автоматичного керування та навігації, використовує поліноміальні функції для опису траєкторій. У працях К.С. Лі (K. S. Lee) (Південна Корея) розглянуті питання застосування МОБЗД для автономних літальних апаратів і та дронів, поліноміальні підходи до опису траєкторій в умовах динамічного оточення. Т.М. Хан (T. M. Han) (Китай) запропонував методи оптимізації для управління рухом в аерокосмічних додатках, зокрема, поліноміальні моделі траєкторії [14].

На сьогодні є спеціалізовані видання (сайти), де оприлюднюється інформація щодо «розумних» бомб: Jane's Defense, Defense One; Military Times; National Defense Magazine; The Center for Study of the Drone; MIT Technology Review; Global Security; Arms Control Wonk; Defense News. Хоча багато з таких ресурсів не зосереджені виключно на «розумних» бомбах, вони пропонують великий контент з суміжних тем і можуть бути корисними у вивченні сучасних тенденцій у галузі високоточної зброї та технологій.

Дослідження «розумних» бомб та високоточної зброї часто здійснюються в рамках ширших досліджень військових технологій, тому на цю тему можуть працювати як окремі фахівці, так і дослідні колективи з університетів, наукових організацій та промислових компаній. Ось кілька закордонних колективів, які активно займаються такою тематикою [14]: RAND Corporation; Center for New American Security (CNAS); MIT Lincoln Laboratory; JohnsHopkins University AppliedPhysics Laboratory; U.S. Army Research Laboratory; International Institute for Strategic Studies (IISS); багато університетів, зокрема, MIT, Stanford та технологічні інститути, які мають дослідні групи та лабораторії, що вивчають технології військового призначення, зокрема, автоматизацію та високоточну зброю.

Існують деякі проекти та розробки в галузі високоточної зброї та «розумних» бомб, які ведуться в Україні [13]: в Державному підприємстві «Спеціальне конструкторське бюро «Промінь»; в Державному підприємстві «Об'єднана компанія «Укроборонпром»; в Національному науковому центрі Харківське конструкторське бюро з машинобудування імені О. О. Морозова»; в ДК «Укроборонпром»; у «Миколаївському авіаремонтному заводі»; науково-дослідних інститутах НАН України.

Відповідний внесок у розвиток методів обернених (зворотних) задач зробили вітчизняні вчені: Артющин Л.М., Дурняк Б.В., Машков О.А., Мамчур Ю.В., Сокіл Б.І., Тимченко О.В., Хитряк О.І. [1, 2, 5, 6, 7, 11, 12].

Важливо зазначити, що деякі праці та дослідження можуть мати закритий доступ або опубліковані у спеціалізованих військових та наукових виданнях. Більшість згаданих авторів публікують свої роботи у наукових журналах, конференціях та на ресурсах, присвячених питанням безпеки та оборони.

Мета статті. Обґрунтувати механізм застосування методу обернених задач динаміки для створення та застосування «розумних» бомб для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України.

Методи дослідження. Під час дослідження, результати якого наведені в праці нижче, використовувалася сукупність наукових методів теорії автоматичного керування, теоретичної механіки та інформаційних технологій при обґрунтуванні можливості створення та застосування «розумних» бомб.

Результати дослідження.

Оцінка напрямків «цивільного» застосування «розумних» бомб.

Основні характеристики «розумної» бомби.

1. Наведення: «розумні» бомби використовують різні системи наведення, зокрема:

– GPS/ГЛОНАСС: система глобального позиціонування для визначення точного розташування.

– Лазерне наведення: бомби націлені на відбитий лазерний промінь, що дозволяє забезпечити високу точність.

– Інфрочервоні та радіолокаційні системи: для наведення на ціль у різних умовах видимості.

2. Точність: «розумні» бомби здатні вражати цілі з високою точністю, часто з відхиленням менше 10 метрів від заданої координати, що значно збільшує ефективність удару та знижує ризик побічних руйнувань.

3. Типи боєприпасів: «розумні» бомби можуть мати різні конструктивні форми, включаючи:

– Авіаційні бомби, що коректуються: зазвичай являють собою звичайні бомби, оснащені навігаційними системами.

– Керовані ракети: також можуть вважатися «розумними» боєприпасами, оскільки вони мають системи наведення та управління.

Застосування «розумних» бомб.

– Військові операції: «розумні» бомби використовуються у сучасних військових операціях для знищення стратегічно важливих об'єктів із мінімальною кількістю жертв серед цивільного населення.

– Авіаудари: можуть застосовуватись як з літаків, так і з безпілотних літальних апаратів.

– Покриття різних цілей: застосовуються проти наземних, морських та повітряних цілей, включаючи будівлі, інфраструктуру та військову техніку.

Переваги застосування «розумних» бомб.

– Зниження побічних ефектів: Висока точність дозволяє мінімізувати збитки для цивільних об'єктів та зменшити кількість жертв серед мирного населення.

– Ефективність: «розумні» бомби можуть вражати цілі, що добре охороняються, які важко знищити звичайними боєприпасами.

Етичні та правові аспекти застосування «розумних» бомб.

– Використання «розумних» бомб викликає етичні та правові питання, особливо в міських зонах, де ризики для цивільного населення зростають.

– Очевидні побічні ефекти: незважаючи на їх високу точність, зв'язок із високоточною зброєю не виключає можливості жертв серед мирного населення.

Майбутнє «розумних» бомб.

Технології «розумних» бомб продовжують розвиватися, зокрема, завдяки в використанню нового покоління навігаційних систем, ефективної обробки даних та взаємодії з іншими пристроями. Дослідження ведуться в галузі автоматизації, що відкриває нові можливості для застосування у складних бойових умовах. Ось деякі напрямки:

1. Навігаційні технології: розроблення нових систем навігації, заснованих на глобальних навігаційних супутникових системах (ГНСС), інерційних навігаційних системах та інших технологіях, що забезпечують більш високу точність та стійкість до перешкод.

2. Штучний інтелект та машинне навчання: використання штучного інтелекту для обробки великих обсягів даних, аналізу цільової обстановки та прийняття складніших рішень: розробку алгоритмів для автоматичної ідентифікації цілей, поліпшення точності наведення та оцінки ризиків.

3. Системи взаємодії: дослідження в галузі мережевої передачі даних між різними бойовими системами, дронами та іншими платформами для покращення координації та обміну інформацією в реальному часі.

4. Нові системи управління та автономії: розроблення більш автономних систем, що можуть діяти з мінімальною або відсутньою участю людини, включаючи використання дронів та роботів.

5. Кібербезпека: дослідження, спрямовані на захист автоматизованих систем від кіберзагроз, включаючи захист даних та побудову надійних архітектур для запобігання несанкціонованому доступу.

6. Етика та правові аспекти: вивчення правових та етичних наслідків використання автоматизованих систем у військових діях, зокрема й дискусії щодо «роботизованих воєн» та можливе використання автономної зброї.

7. Потенціал застосування нових матеріалів та технологій: дослідження в галузі нових матеріалів, які можуть покращити характеристики вибухових речовин та конструкції боєприпасів.

Такі напрямки досліджень дозволяють підвищити ефективність застосування «розумних» бомб. Люди звикли асоціювати бомби з веденням військових дій та руйнуваннями. Тепер з'явилася цікава ідея щодо

мирного застосуванням авіаційних бомб та мін. «Килимові бомбардування» допоможуть перенести і засіяти порожні землі насінням дерев і рослин.

Незвичайна концепція бомби – Seedbomb («Насіннева бомба»). «Богоголовка» цієї бомби начинена насінням дерева (рис. 1).

Бомби призначені для боротьби з опустеленням та вирубуванням дерев. Насіння, одягнені в капсули синтетичного ґрунту, які поступово руйнуються, забезпечують рослину необхідними мінеральними речовинами, а також регулюють процес зволоження ґрунту.

Страшні вогняні шторми, які випалюють величезні площі, можна погасити упродовж дня. Одна бомба, що містить майже півтонни вогнегасної суміші, здатна задавити полум'я навіть за умов страшного вогневого шторму на площі 1000 квадратних метрів [8-10, 13, 14]. Відомі результати дослідження створення на основі військових технологій справжні дива мирного застосування «розумних» бомб, наприклад, протипожежна авіабомба АСП-500. Це авіаційний засіб пожежогасіння масою 500 кілограм.

Відомо, що найпотужніші неядерні боєприпаси створюються на основі об'ємно-детонуючих сумішей. Вітчизняним розробникам вдалося реалізувати принцип розпилення таких сумішей у мирних цілях. Замість вибухової речовини миттєво розпорошувався вогнегасний склад. Полум'я збивалося, і, за нестачі кисню, якийсь час горіння не відновлювалося [9, 10, 13, 14]. До речі, за допомогою АСП-500 можна гасити і точкові осередки займання. Якби

спалахнув, припустимо, цех якогось заводу, літаки Су-25 з пікірування могли покласти бомби саме до нього. Більше того, щоб потрапити, образно кажучи, у вікно висотки, що горить, може розглядатися варіант створення керованих плануючих бомб АСП, причому різних вагових категорій. Відмінною стороною нового виду боєприпасів повинна стати повна безпека для людини. Допрацьована АСП-500 може скидатися з літака АН-70. При цьому один захід АН-70 може забезпечити гарантоване придушення вогню на площі 10 га. Нові розрахунки лише підтвердили те, що було відомо вже наприкінці вісімдесятих: ефективність боротьби з найстрашнішими пожежами зростає у десятки разів. А зараз на виснажливу боротьбу з вогнем йдуть тижні, і навіть місяці за величезних фінансових витрат. Тисячі тон води, скинуті з висоти кілька сотень метрів – нижче літати при сильній пожежі небезпечно – здебільшого випаровуються, не долетівши до землі.

Не дивно, що при пожежах вогонь стихає тоді, коли все вигоріло, а не після авіаційного поливу. Тому потрібно докорінно переглянути сам підхід до боротьби з лісовими пожежами. Вважається, що торф'яні пожежі ефективно гасити взагалі неможливо. Адже вогонь вірус десь глибоко під землею. Тим часом, технологія боротьби з торфом, що горить, може застосовувати використання «розумних» бомб. РБ пробивають верхній шар торфу та розриваються у порожнини основної пожежі. Родзинка полягає в тому, що РБ начинені не тротилом і гексогеном, а реагентами, що переривають горіння на рівні фізико-хімічних процесів. Прицільний обстріл лікві-

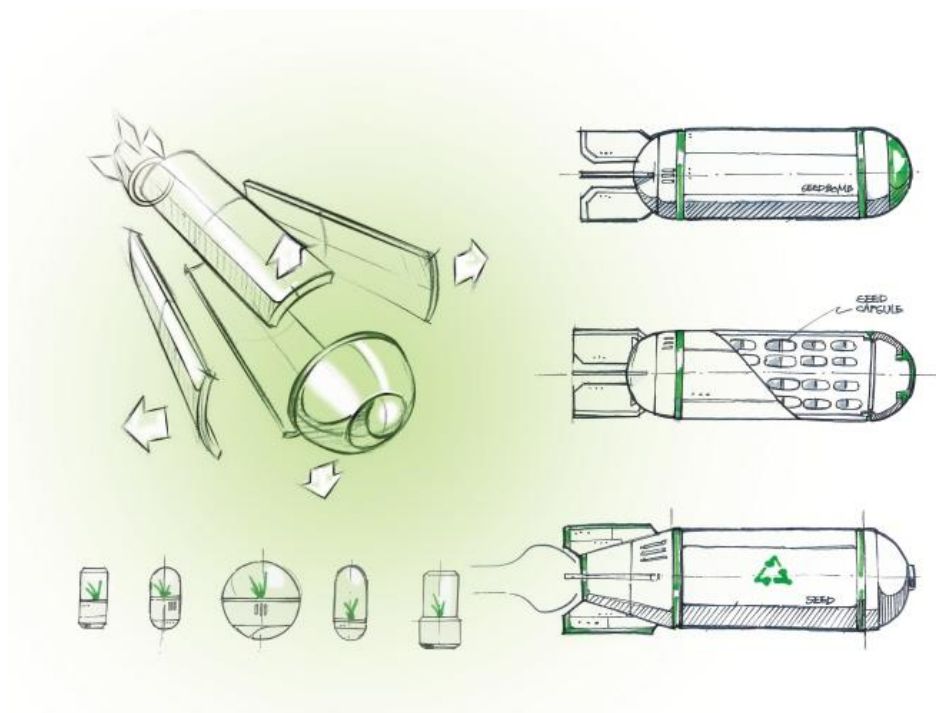


Рис. 1. Насіннева бомба

дує вогонь у найстрашнішому торф'яному пеклі за лічені хвилини. А далі вже можна закачувати воду та активно охолоджувати торфовища, перемішуючи шари ґрунту. Тому вважаємо за доцільне створення міжвідомчої структури, яка змогла б вирішити питання створення боєприпасових систем пожежогасіння, а також визначати, коли і кому такі системи застосовувати.

З пожежами борються ДСНС, і вогнегасні міни з бомбами, начебто, відомству дуже потрібні, але ця служба немає засобів їх доставки у вогнище пожежі. Немає у них ані бомбардувальників, ані мінометних розрахунків. Все це – у міністерстві оборони. При цьому застосування «розумних» бомб може привести до зменшення загальної вартості боротьби зі стихійними лихами у сотні, а то й у тисячі разів.

Особливості застосування методу обернених задач динаміки під час створення та застосування «розумних» бомб.

«Розумні» бомби, також відомі як керовані боєприпаси або точні боєприпаси, є видом зброї, що оснащена системами наведення та управління, які дозволяють їм точно націлюватися на певні об'єкти. Зважаючи на те, що обладнання «розумної» бомби має обмеження за вагою та габаритами, пропонується в системі керування «розумною» бомбою формувати алгоритми керування рухом за методом обернених задач динаміки (МОБЗД). Відомо, що метод обернених завдань динаміки (МОБЗД) є потужним інструментом для вирішення задач управління рухом та оптимізації траєкторій. Метод обернених (зворотних) завдань динаміки (МОБЗД) знаходить застосування у різних галузях, включаючи аерокосмічну інженерію, робототехніку та системи керування та динаміки.

Розробку алгоритмів синтезу керування для «розумних» бомб (РБ) передбачається здійснювати з використанням концепції зворотних задач динаміки [12]. Ця концепція передбачає формалізацію задачі здійснення заданої траєкторії руху та стабілізацію програмного руху (термінального керування, адаптивного стеження).

У прямій постановці задача синтезу алгоритмів адаптивних систем керування програмним рухом РБ зводиться до визначення законів формування керуючих функцій U_n^0 (переміщення керуючих механізмів системи, відхилення рульових органів) за умови досягнення деяких показників, що побічно характеризують якість процесу керування J .

У зворотній постановці задача визначення U_n^0 розглядається в два етапи. На першому етапі визначаються керуючі сили F , що надають системі необхідний рух. Ці сили можуть відповідати реальним фізичним силам і моментам, які необхідно прикласти до об'єкта керування для забезпечення оптимального програмного руху $X_n^0(t)$. На другому етапі розглядаються питання практичної реалізації необхідних сил і визначаються керуючі функції $U_n^0(t)$.

Розглянемо керований об'єкт (РБ), стан якого у момент часу t описується вектор-функцією $X(t) = [X_1(t), \dots, X_n(t)]$. Компоненти $X_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ створюють фазові координати, а n -вимірний евклідовий простір R^n точок X – простір станів. Динаміка руху керованого об'єкта (РБ) в часі описується матричним диференціальним рівнянням

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F[X(t), U(t), Z(t)] + P(t); \\ X(t_0) &= X_0, \quad t \in [t_0, t_T], \end{aligned} \quad (1)$$

де $U(t)$ – m -вимірний вектор керуючих впливів; $Z(t)$ – r -вимірний вектор параметрів об'єкта;

$$\Xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t), \dots, \xi_r(t)]$$

$P(t)$ – n -вимірний вектор зовнішніх збурень; X_0 – початковий стан; $T = t_T - t_0$ – час руху об'єкта. На керування і стан об'єкта задані обмеження

$$X(t) \in Q_X; \quad U(t) \in Q_U.$$

На інтервалах часу $[t_0, t_T]$ функція керування $U(t)$ кусково-неперервна і може мати в ізольованих точках розриви першого роду. Вважаємо, що значення параметра ξ_i невідомі, причому відома тільки обмежена множина $Q_\xi = \{\Xi\}$ допустимих значень параметра ξ_i . Крім того вважаються невідомими як зовнішні збурення, що постійно діють $P(t)$, так і їхні імовірнісні властивості. Це пов'язано з тим, що збурення розглядаються як неспостережувані і невимірювані. Щодо збурень $P(t)$ відомо, що $P(t) \in Q_p$ при всіх $t \in [t_0, t_T]$ де Q_p – задана фізична множина. Метою керування є забезпечення руху РБ за заданою штатною траєкторією руху шляхом відповідного вибору $U(t) \in Q_u$. Під програмою руху об'єкта розуміємо бажаний закон зміни в часі стану $X(t)$. Програмний рух можна побудувати виходячи з різних міркувань. Програмне керування $U_n(t)$ і породжуване ним $X_p(t)$ називатимемо оптимальними і позначати відповідно $U_n^0(t)$, $X_n^0(t)$ якщо вони забезпечують мінімум заданому функціоналу якості

$$J[U_n^0(\cdot), X_n^0(\cdot)] = \min J[U_n(\cdot), X_n(\cdot)].$$

Залежно від вимог, що пред'являються до системи керування РБ, можна виділити три основні задачі: задача стабілізації програмного руху; задача термінального керування; задача адаптивного стеження [12]. Розглянемо особливості застосування методу зворотних задач для РБ, що описується матричним рівнянням в операторній формі [12]

$$A(p)X = B(p)U, \quad (4)$$

$$A(p) = \{a_{ij}(p)\}, \quad i, j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$X^T = [X_1 \dots X_n], \quad (6)$$

$$B(p) = \{b_{ij}(p)\}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, r}, \quad (7)$$

$$U^T = [U_1 \dots U_r]. \quad (8)$$

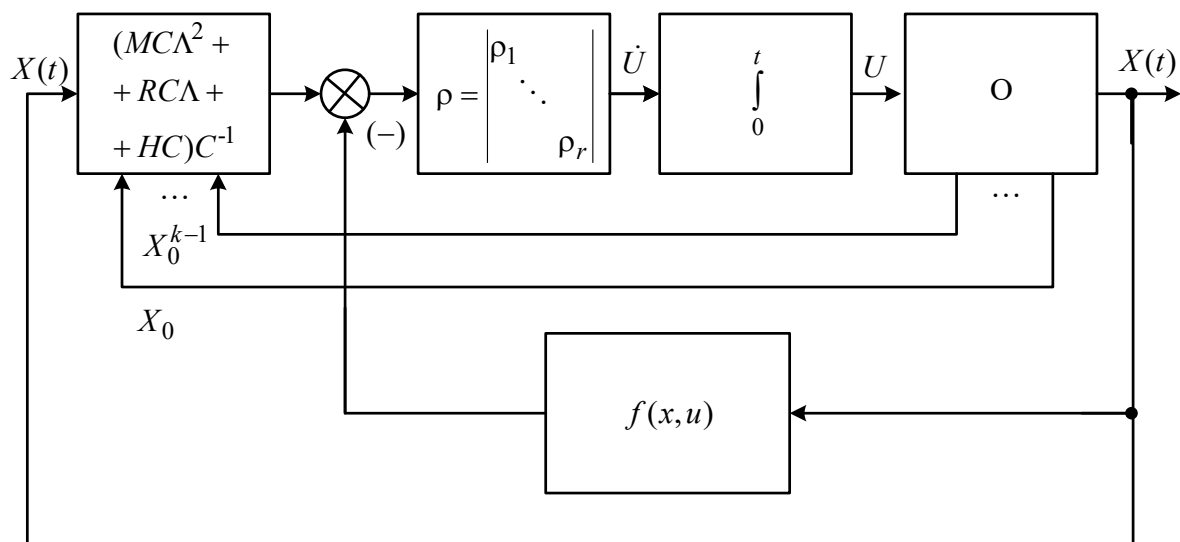


Рис. 2. Структурна схема алгоритму керування «розумною» бомбою

Відшукування виразу для керуючої сили закінчується першим етапом вирішення заданої задачі. Розглянемо наступний етап, пов'язаний з реалізацією програми зміни сили. Задача практичної реалізації алгоритму керування силою f_n полягає у визначенні вектору керуючих функцій U_n тобто величин відхилень органів керування, за допомогою яких створюється сила $f_n[X_n, U_n]$. Очевидно, що вирішення такого завдання визначається структурою і параметрами об'єкта керування та вимірюваною інформацією. Структурна схема алгоритму керування, побудованого відповідно до (21), приведена на рис. 2.

Таким чином, побудова алгоритмів керування рухом РБ за методом обернених задач динаміки має два аспекти. Перший з них пов'язаний з безпосереднім формуванням вектора потрібної керуючої сили $f^*[x]$, а другий – з обчисленням значень елементів вектора керуючої функції $U_n(t)$, який створює необхідну силу f^* . Розрахункові співвідношення, за допомогою яких обчислюються f^* і $U_n(t)$ і складають зміст алгоритму керування рухом. Оскільки керування рухом здійснюється за принципом керування силою, отриманий алгоритм керування є адаптивним, його динамічні властивості адекватні динамічним властивостям системи. Коефіцієнти системи керування РБ визначаються початковими параметрами руху об'єкта, а також заданої програмної траєкторії. Це дозволяє змінювати параметри програмної траєкторії під час руху об'єкта.

Висновки. У праці розглянуті питання застосування «розумних» бомб з алгоритмом керування

на основі використання методу обернених (зворотних) задач динаміки. Обґрунтовано механізм застосування методу обернених задач динаміки для створення та застосування «розумних» бомб для вирішення завдань захисту довкілля та природних ресурсів України. Під час дослідження використовувалася сукупність наукових методів теорії автоматичного керування, теоретичної механіки та інформаційних технологій при обґрунтуванні можливості створення та застосування «розумних» бомб.

Надано оцінку напрямків «цивільного» застосування «розумних» бомб, означено основні характеристики «розумної» бомби. Розглянуті етичні та правові аспекти використання «розумних» бомб та їхнє майбутнє, а також особливості застосування методу обернених задач динаміки під час створення та застосування «розумних» бомб. Здійснено формалізацію завдання щодо заданої траєкторії руху «розумної» бомби (стабілізації програмного руху; термінального керування; адаптивного стеження). Запропонована структурна схема алгоритму керування «розумною» бомбою.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці алгоритмів керування РБ різного практичного призначення із заданими динамічними властивостями на основі вирішення зворотних задач динаміки. Доцільно також розглядати процеси керування РБ у стохастичній постановці при стабілізації РБ на оперативному-програмованій траєкторії на основі рішення оберненої (зворотньої) задачі динаміки, що забезпечує підвищення точності ураження та ефективності застосування «розумних» бомб.

Література

1. Артющин Л.М. Оптимальне керування динамічною системою на основі розв'язку оберненої задачі динаміки / Доповіді Академії наук Української РСР, № 7, Серія А. Фізико-математичні та технічні науки: Кібернетика та обчислювальна техніка, 1987. С. 60-63.

2. Артюшин Л.М. Синтез алгоритмів керування рухом складних механічних систем за методом обернених задач динаміки / Доповіді Академії наук Української РСР, № 8, Серія А. Фізико-математичні та технічні науки: Кібернетика та обчислювальна техніка, 1986. С. 73-76.
3. Артюшин Л.М., Герасименко В. В., Коваль В. В. Метод формування спільної авіаційної групи. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, № 1(40)/2021. С. 63–68.
4. Артюшин Л.М. Герасименко В. В., Коваль В. В. Синтез раціональних структур бойових порядків спільних авіаційних груп. Журнал наукових праць “Соціальний розвиток та безпека”. Том 11, № 3, 2021. С. 209–220.
5. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (детермінована постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. Київ, 2018. Вип. 82. С. 166-176.
6. Машков О.А., Дурняк Б.В., Мамчур Ю.В., Тимченко О.В. Синтез алгоритму програмного керування на тренажері дистанційно пілотованого літального апарату на основі алгоритмічної процедури рішення зворотної задачі динаміки (стохастична постановка) / Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ НАН України. – Київ, 2018. Вип. 83. С. 146-153.
7. Машков О.А., Мамчур Ю.В. Формалізація задачі підготовки на тренажері оператора керування безпілотним літальним апаратом екологічного моніторингу на основі вирішення зворотних задач динаміки / Новітні технології. Збірник наукових праць Приватного вищого навчального закладу “Університет новітніх технологій”. К.: ПВНЗ “Університет новітніх технологій”, 2018. Випуск 2(6), С. 24-30.
8. Неклонський І.М. Тактика ліквідування надзвичайних ситуацій: / Курс лекцій – Х.: НУЦЗУ, 2017. 367 с.
9. Про затвердження Методичних рекомендацій із складання, корегування та відпрацювання оперативних карток гасіння пожеж : наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 24.10.2023 р. №НС-848. URL: <https://kv.dsns.gov.ua/upload/1/9/3/1/3/5/3/nakaz-dsns848-vid-24102023.pdf>.
10. Про особливості реагування на надзвичайні ситуації під час збройної агресії: наказ Державної служби України з надзвичайних ситуацій від 02.04.2024 р. № 375. URL: <https://dsns.gov.ua/upload/2/0/8/0/8/1/6/rekom.pdf>.
11. Сокіл Б.І. Обернені задачі динаміки нелінійних систем із розподіленими параметрами та один підхід до їх розв’язання / Б.І. Сокіл, О.І. Хитряк // Науковий вісник УкрДЛТУ : зб. наук.-техн. праць. Львів : Вид-во УкрДЛТУ. 2009. – № 19.10. С. 64-67.
12. Теорія автоматичного керування / Л.М. Артюшин, О.А. Машков, Б.В. Дурняк, М.С. Сивов. Львів: Вид-во УАД, 2004. 272 с.
13. Чумаченко С.М., Барбашин В.В., Маринін А.І., Мошенський А.О., Струнін І.В. Аналіз існуючих підходів для оцінки ефективності в предметній галузі авіаційного пошуку та рятування / Інженерія природокористування, 2020, № 3(17), С. 118 – 125.
14. Sawicki T. Pożary: przyczyny, metodyka, przykłady: (wybrane zagadnienia) : book 1-e Wyd. Lubin : Specjalistyczne Biuro Badań Pożarów Tomasz Sawicki, 2021. 237.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРАХУНКУ КОМПЛЕКСНОГО ІНДЕКСУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ТА НАПРЯМИ ЙОГО ВДОСКОНАЛЕННЯ В УКРАЇНІ

Іваненко М.К., Притула Н.М.

Запорізький національний університет

вул. Гоголя, 62, 69600, м. Запоріжжя

ivanenkom2000@gmail.com, prytulanataliam@gmail.com

У статті здійснено критичний аналіз Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА), який широко застосовується в Україні для оцінки якості атмосферного повітря. Наведено аргументи щодо неадекватності методології розрахунку індексу та його обмеженої здатності відображати реальний стан забруднення у містах з різним індустриальним навантаженням. Підкреслено, що КІЗА базується на сукупному врахуванні лише кількох пріоритетних речовин, при цьому набір цих речовин різниться залежно від міста, що унеможливляє порівнянність даних між регіонами. Окрім того, індекс не враховує комбіновану токсичну дію забруднювачів та ігнорує наявність порогових значень (гранично допустимих концентрацій), що суперечить базовим принципам гігієнічного нормування.

Наголошено також на відсутності стандартизованих порогових меж, що дозволили б класифікувати рівень забруднення як допустимий, середній чи критичний. Внаслідок цього КІЗА є інформативно обмеженим для прийняття рішень у сфері охорони здоров'я та планування природоохоронних заходів.

Як альтернативу запропоновано застосовувати підходи, орієнтовані на оцінку ризиків для здоров'я населення, зокрема методику визначення індексу ризику з урахуванням токсичності кожного інгредієнта. Розглянуто приклади використання просторового моделювання розподілу забруднювачів за допомогою геоінформаційних систем, а також значення метеорологічної нормалізації концентрацій для коректного аналізу довготривалих трендів забруднення.

У результаті дослідження запропоновано рекомендації щодо вдосконалення системи моніторингу якості повітря в Україні: перегляд методології КІЗА, її уніфікація на національному рівні, запровадження просторово-часових моделей, формалізація порогових меж та інтеграція підходів оцінки ризиків. Такий підхід дозволить підвищити точність та об'єктивність оцінки стану атмосферного повітря та забезпечить підґрунтя для ефективного управління екологічною безпекою. *Ключові слова:* атмосферне повітря; моніторинг; КІЗА; індекс ризику; просторове моделювання.

Critical analysis of the methodology for calculating the Complex Air Pollution Index and directions for its improvement in Ukraine. Ivanenko M., Prytula N.

The article presents a critical analysis of the Complex Air Pollution Index (CAPI), which is widely used in Ukraine to assess the quality of ambient air. The authors highlight methodological flaws in the index's calculation and its limited capacity to reflect the real state of pollution in cities with diverse industrial burdens. The CAPI considers only a limited number of key pollutants, which vary between cities, rendering comparisons across regions scientifically invalid. Moreover, the index does not account for the combined toxic effects of pollutants and disregards threshold values (maximum permissible concentrations), contradicting the basic principles of hygienic regulation.

The study also draws attention to the lack of standardized classification thresholds, which would allow the pollution level to be evaluated as acceptable, moderate, or critical. Consequently, the CAPI lacks informative value for public health decision-making and environmental policy development.

As an alternative, the article suggests applying health risk-oriented approaches, particularly the use of risk index calculation that incorporates the toxicity of each pollutant. Examples are provided of spatial modelling of pollutant distribution using geographic information systems (GIS), as well as the importance of meteorological normalization of concentrations for the accurate analysis of long-term pollution trends.

Based on the findings, the authors recommend several improvements to Ukraine's air quality monitoring system: revising the CAPI methodology, unifying it at the national level, introducing spatial-temporal models, formalizing threshold categories, and integrating health risk assessment techniques. This integrated approach will enhance the accuracy and objectivity of air quality assessments and provide a scientific basis for efficient environmental safety management. *Key words:* ambient air; monitoring; CAPI; risk index; spatial modelling.

Постановка проблеми. Забруднення атмосферного повітря є одним із найсерйозніших екологічних викликів сучасності, що безпосередньо впливає на здоров'я населення та стійкість природних систем. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я

(ВООЗ), у 2019 році вплив забрудненого повітря спричинив близько 4,2 мільйона передчасних смертей у світі, з них значна частка припала на країни Європи та Центральної Азії [2]. В Україні проблема забруднення повітря також є гострою: за даними

Програми розвитку ООН, середньорічна концентрація дрібнодисперсних частинок ($PM_{2.5}$) у великих містах перевищує гранично допустимі рівні, а кількість передчасних смертей, пов'язаних із цим фактором, оцінюється у понад 40 тисяч на рік [3].

Актуальність дослідження. В умовах посилення антропогенного тиску на довкілля особливого значення набуває ефективна система моніторингу якості атмосферного повітря. Її основне завдання полягає не лише у фіксації концентрацій забруднювальних речовин, а й у формуванні узагальнених індикаторів, що дозволяють швидко оцінити екологічну ситуацію та приймати відповідні управлінські рішення. Одним із таких індикаторів в Україні є Комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА), що використовується Державною гідрометеорологічною службою як узагальнений показник рівня забруднення повітря у містах [1].

Інтегративний характер КІЗА дозволяє формально зіставляти стан повітря в різних населених пунктах на основі концентрацій низки хімічних речовин. Проте, попри поширене застосування, індекс має суттєві методологічні обмеження, що знижують його достовірність та корисність для стратегічного екологічного планування. Зокрема, КІЗА не враховує просторових і часових змін у забрудненні, комбінованої дії речовин, відмінностей у токсичності, а також часто базується на різному наборі домішок у різних містах. Крім того, в існуючій практиці немає чітко визначених порогових категорій індексу, що ускладнює його інтерпретацію для прийняття практичних рішень.

Таким чином, постає необхідність у критичному аналізі підходу до застосування КІЗА в Україні та пошуку альтернатив, які дозволили б здійснювати більш об'єктивну, науково обґрунтовану та функціональну оцінку якості атмосферного повітря.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Метою дослідження є критичне осмислення наукової та прикладної доцільності використання Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) як основного індикатора оцінки якості повітря в містах України, а також обґрунтування потреби у вдосконаленні методичних підходів до моніторингу стану атмосферного повітря.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати теоретичні засади, структуру та практику застосування КІЗА в національній системі моніторингу довкілля.

2. Визначити ключові методологічні недоліки індексу, зокрема його варіативність за складом речовин, нечіткість порогових категорій та ігнорування комбінованої дії забруднювачів.

3. Оцінити відповідність КІЗА сучасним підходам до оцінки ризиків для здоров'я населення та екологічної безпеки.

4. Описати перспективні альтернативи КІЗА: підходи на основі оцінки здоров'я-ризиків, просторового моделювання та метеорологічної корекції.

5. Сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо вдосконалення методичних підходів до інтегральної оцінки якості атмосферного повітря в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика оцінки якості атмосферного повітря за допомогою інтегральних індексів є предметом активного наукового обговорення як в Україні, так і за кордоном. У вітчизняних дослідженнях комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА) традиційно розглядається як базовий інструмент державного моніторингу (напр., праці Державної гідрометеорологічної служби України). Водночас останні роки засвідчили зростаючий інтерес до критичної оцінки його методологічних основ та прикладної ефективності.

Зокрема, Rybalova та ін. (2022) проаналізували обмеження КІЗА в контексті виявлення пріоритетних забруднювачів у промислово навантажених регіонах і показали доцільність використання індексів ризику, що враховують токсичність речовин. У свою чергу, Maksymenko et al. (2024) продемонстрували ефективність геоінформаційного просторового моделювання для деталізації зон перевищення концентрацій та встановлення просторових закономірностей забруднення.

Міжнародні дослідження також акцентують на необхідності метеорологічної нормалізації даних задля виявлення довготривалих трендів. Зокрема, у роботі Qiu et al. (2022) обґрунтовано застосування методів машинного навчання для декомпозиції часових рядів забруднення з урахуванням впливу погодних умов, що забезпечує більш точну інтерпретацію екологічних змін.

Незважаючи на наявні наукові напрацювання, в українському контексті недостатньо реалізовано інтеграцію ризик-орієнтованих моделей, просторових підходів та нормалізаційних методів у державній системі моніторингу. Це обумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на оновлення концептуальних та методичних засад оцінки якості повітря.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Застосування КІЗА у практиці екологічного моніторингу має низку суттєвих обмежень:

1. **Нерівномірність складу індексу за містами.** У різних населених пунктах для обчислення КІЗА враховується різна кількість домішок – від 3 до 11 речовин, залежно від доступності даних [1]. Це означає, що КІЗА не є стандартизованим показником і не дозволяє здійснювати повноцінне порівняння рівнів забруднення між містами. Наприклад, в одному місті домінуючими є пилоподібні фракції та діоксид азоту, а в іншому – формальдегід і бензол, однак загаль-

ний індекс може бути однаковим, попри відмінності у токсичності.

2. Відсутність порогових категорій. Наразі у чинних документах немає офіційно визначених меж для інтерпретації значень КІЗА. Це унеможливує класифікацію рівня забруднення як «низький», «помірний», «високий» тощо, що, у свою чергу, ускладнює комунікацію з громадськістю та розробку управлінських заходів.

3. Ігнорування комбінованої дії речовин. Методологія КІЗА ґрунтується на припущенні про лінійне адитивне поєднання впливів окремих речовин. Водночас численні токсикологічні дослідження свідчать про наявність синергічних або антагоністичних ефектів, що виникають при взаємодії забруднювачів у повітряному середовищі [5]. Такий підхід не дозволяє коректно оцінити реальний екологічний і гігієнічний ризик.

4. Ігнорування часового фактору. КІЗА зазвичай розраховується на основі середньорічних або середньомісячних концентрацій, що приховує пікові забруднення, які можуть мати значні гострі ефекти на здоров'я населення.

5. Загалом ці обмеження ставлять під сумнів ефективність КІЗА як інструмента для стратегічного екологічного планування та охорони здоров'я.

Новизна. Проведено комплексну критичну оцінку методології Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА), що використовується в Україні, з акцентом на її невідповідність сучасним науковим підходам до оцінки якості повітря. Запропоновано інтеграцію ризик-орієнтованих підходів, просторового моделювання та метеорологічної нормалізації як перспективні напрями вдосконалення системи моніторингу. Сформульовано конкретні рекомендації щодо уніфікації індексу, встановлення порогових категорій та врахування комбінованої дії забруднювачів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження критично переосмислює підходи до інтегральної оцінки якості атмосферного повітря, які застосовуються в Україні. Запропоновані напрями вдосконалення – уніфікація складу індексу, введення порогових категорій, інтеграція оцінки ризиків і просторово-часове моделювання – відповідають сучасним міжнародним стандартам моніторингу довкілля.

Виклад основного матеріалу. Комплексний індекс забруднення атмосфери (КІЗА) є узагальненим показником, який формується шляхом об'єднання відносних концентрацій кількох забруднювальних речовин, що переважно перевищують гігієнічні нормативи у конкретному місті [3]. Основою розрахунку КІЗА є формула, яка включає середні концентрації n домішок, нормовані за гранично допустимими концентраціями (ГДК) і ваговими коефіцієнтами, що відображають ступінь їхньої небезпеки.

У міжнародній практиці все ширше застосовуються інші методи інтегральної оцінки, що мають

на меті більш адекватно відображати вплив забруднення на довкілля та здоров'я населення.

Оцінка ризику для здоров'я. Цей підхід ґрунтується на розрахунку індивідуальних та сумарних індексів ризику з урахуванням токсичності кожного забруднювача, а також характеру його впливу (мутагенного, канцерогенного, репродуктивного тощо). Як показали дослідження Rybalova et al. (2022), ризик-орієнтовані оцінки дозволяють більш точно ідентифікувати критичні для здоров'я домішки у промислово навантажених регіонах України, таких як Маріуполь, Запоріжжя чи Кривий Ріг [6].

Просторове моделювання. ГІС-аналітика та інтерполяційні методи дозволяють будувати карти забруднення з високою роздільністю, виявляючи локальні зони перевищення та встановлюючи кореляцію з джерелами викидів. Так, у дослідженні Maksymenko et al. (2024) запропоновано методику просторового аналізу розподілу вмісту основних забруднювачів у Харкові, яка дозволяє точніше визначати пріоритетні зони для втручання [7].

Метеорологічна нормалізація. Погодні умови істотно впливають на рівні концентрацій забруднювачів (температура, вітер, вологість, атмосферна стійкість тощо). Нормалізація даних за допомогою методів машинного навчання дає змогу виділити довгострокові тренди забруднення, незалежно від короткострокових коливань погоди. Дослідження Qiu et al. (2022) демонструє ефективність таких підходів для трендового аналізу $PM_{2.5}$ і озону в умовах мінливого клімату [5].

Результати аналізу свідчать про доцільність перегляду методології КІЗА в таких аспектах:

1. стандартизація складу індексу (уніфікований набір забруднювачів);
2. запровадження чітко визначених порогових категорій оцінки;
3. інтеграція індексу з оцінкою ризиків для здоров'я населення;
4. врахування просторових та часових характеристик забруднення;
5. застосування сучасних методів нормалізації, що враховують метеорологічні фактори.

Врахування цих аспектів дозволить підвищити наукову достовірність, об'єктивність та управлінську цінність оцінок якості атмосферного повітря в Україні.

Головні висновки. Проведене дослідження дозволило виявити низку концептуальних і прикладних обмежень у застосуванні Комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА) як основного індикатора оцінки якості повітря в Україні. Встановлено, що:

1. індекс не є стандартизованим – у його розрахунках у різних містах використовується різна кількість забруднювальних речовин, що унеможливує міжрегіональне порівняння;
2. методика не враховує комбінованої дії речовин, їхньої токсичності та синергетичних ефектів;

3. відсутні формалізовані порогові значення для інтерпретації індексу, що ускладнює практичне використання даних моніторингу;

4. індекс ігнорує короткострокові пікові перевищення та вплив метеорологічних умов.

Водночас сучасна міжнародна практика екологічного моніторингу вказує на доцільність переходу до більш комплексних підходів, що поєднують просторовий аналіз, нормалізацію за погодними факторами та оцінку ризиків для здоров'я населення. Зокрема, застосування інтегрованих ризик-орієнтованих моделей дозволяє точніше визначати пріоритетні забруднювачі, зони небезпеки та напрями регіональної політики охорони атмосферного повітря.

У цьому контексті доцільно рекомендувати:

1. Оновлення методики КІЗА із запровадженням єдиного набору речовин для розрахунку;

2. Встановлення порогових категорій індексу (низький, помірний, високий ризик тощо);

3. Інтеграцію оцінки КІЗА з показниками здоров'я-ризиків та токсичності речовин;

4. Використання геоінформаційного просторового моделювання забруднення;

5. Застосування методів метеорологічної нормалізації для виявлення трендів.

Удосконалення підходів до оцінки якості повітря дозволить підвищити ефективність управління екологічною безпекою, зробити моніторинг більш прозорим і науково обґрунтованим, а також сприятиме поліпшенню якості життя населення.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення методичних підходів у державній системі моніторингу атмосферного повітря, зокрема при перегляді формули КІЗА, уніфікації набору забруднювальних речовин та впровадженні порогових категорій оцінки. Запропоновані альтернативи – ризик-орієнтовані моделі, просторове моделювання та метеорологічна нормалізація – можуть стати основою для розробки інтегрованих індикаторів, що краще відображають екологічну та гігієнічну ситуацію в містах. Застосування цих підходів сприятиме підвищенню точності екологічного аналізу, обґрунтованості управлінських рішень і ефективності заходів із охорони здоров'я населення та довкілля.

Література

1. Методика розрахунку комплексного індексу забруднення атмосфери (КІЗА). Вид. офіц. Київ : Центр. геофіз. обсерваторія ім. Б. Срезнев., 2020. 25 с.
2. Ambient (outdoor) air pollution. *World Health Organization (WHO)*. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (date of access: 25.05.2025).
3. Europe's air quality status 2023. *European Environment Agency*. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023> (date of access: 25.05.2025).
4. Health impacts and social costs associated with air pollution in larger urban areas of Ukraine. *United Nations Development Programme*. URL: <https://www.undp.org/ukraine/publications/health-impacts-and-social-costs-associated-air-pollution-larger-urban-areas-ukraine> (date of access: 23.05.2025).
5. Qiu M., Zigler C., Selin N. E. Statistical and machine learning methods for evaluating trends in air quality under changing meteorological conditions. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22, no. 16. P. 10551–10566. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-22-10551-2022> (date of access: 25.05.2025).
6. Risk assessment for public health from air pollution in the industrial regions of Ukraine / O. Rybalova et al. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series Geology. Geography. Ecology*. 2022. No. 56. P. 240–254. URL: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-18> (date of access: 25.05.2025).
7. Spatial modeling of air pollution in Kharkiv city / N. Maksymenko et al. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2024. Vol. 1, no. 33. P. 108–117. URL: <https://doi.org/10.15421/112412> (date of access: 30.11.2024).

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ФОРМУВАННЯ СОЦІАЛЬНО-ЕКОЛОГІЧНОЇ ВІДПОВІДАЛЬНОСТІ МОЛОДІ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ STEM-ОСВІТИ

Літвак О.А.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
пр. Героїв України, 9, 54007, м. Миколаїв
olya.litvak@gmail.com

У статті розглянуто потенціал STEM-освіти як ефективного інструменту формування соціально-екологічної відповідальності сучасної молоді в умовах трансформації системи вищої освіти та глобальних викликів сьогодення. Обґрунтовано, що міждисциплінарність, практична спрямованість, проєктне та проблемно-орієнтоване навчання, що характерні для STEM-підходу, створюють передумови для формування у студентів екологічної свідомості, громадянської активності та відповідального ставлення до довкілля і суспільства. Проаналізовано сучасні підходи до змісту STEM-освіти та представлено педагогічні інструменти, які сприяють розвитку екологічної свідомості молоді. Особливу увагу приділено потенціалу проєктної діяльності як засобу активізації громадянської позиції студентів, формування навичок міжсекторальної взаємодії та відповідальності за результати колективних рішень. Підкреслено важливість залучення молоді до міждисциплінарних ініціатив, спрямованих на вирішення реальних екологічних викликів, що створює підґрунтя для формування нового типу фахівця – технічно підготовленого, соціально свідомого та екологічно орієнтованого. У дослідженні проаналізовано рівень зацікавленості молоді у STEM-проєктах екологічного спрямування, зокрема участь студентів технічних спеціальностей у хакатонах, екоконкурсах, цифрових ініціативах, пов'язаних із сталим розвитком. Визначено, що, попри зростання інтересу до екологічної тематики, участь молоді часто залишається епізодичною та залежить від наявності ресурсів, підтримки з боку викладачів і адміністративних органів, а також особистісної мотивації. Серед основних внутрішніх мотиваційних чинників виділено занепокоєність екологічними проблемами і бажання зробити внесок у захист довкілля, прагнення до самореалізації, інтерес до інновацій. Натомість бар'єрами виступають обмеженість часу, недостатня інтеграція екологічних модулів у навчальні програми, слабкий зв'язок із реальними потребами громади та відсутність системної інституційної підтримки студентських ініціатив. У висновках обґрунтовано необхідність цілісного підходу до впровадження STEM-освіти з урахуванням цінностей сталого розвитку, посилення ролі студентських екологічних ініціатив, а також розвитку партнерства між університетами, громадами та бізнесом. *Ключові слова:* STEM-освіта, соціально-екологічна відповідальність, сталий розвиток, молодь, екологічна свідомість, міждисциплінарний підхід, проєктне навчання, мотивація.

Formation of youth's socio-ecological responsibility through the implementation of STEM education concept. Litvak O.

The article explores the potential of STEM education as an effective tool for fostering socio-ecological responsibility among today's youth in the context of the transformation of the higher education system and the global challenges of our time. It substantiates that interdisciplinarity, practical orientation, project-based and problem-centered learning – all key features of the STEM approach – create favorable conditions for developing students' environmental awareness, civic engagement, and responsible attitudes toward the environment and society. The paper analyzes current approaches to the content of STEM education and presents pedagogical tools that support the development of young people's ecological consciousness. Particular attention is given to the potential of project-based learning as a means of activating students' civic responsibility, developing cross-sectoral collaboration skills, and fostering accountability for the outcomes of collective decision-making. The importance of involving youth in interdisciplinary initiatives aimed at addressing real environmental challenges is emphasized, as this lays the foundation for forming a new type of specialist – technically competent, socially conscious, and environmentally oriented. The study also analyzes the level of interest among youth in environmentally focused STEM projects, particularly the involvement of students of technical specialties in hackathons, eco-competitions, and digital initiatives related to sustainable development. It is noted that despite the growing interest in environmental issues, youth participation often remains episodic and depends on available resources, support from educators and university administrations, as well as personal motivation. Among the key motivational factors are concern about ecological problems, the desire to contribute to environmental protection, self-realization, and interest in innovation. On the other hand, the main barriers include time constraints, insufficient integration of ecological modules into curricula, weak links with real community needs, and the lack of systematic institutional support for student initiatives. The conclusions justify the need for a holistic approach to the implementation of STEM education that integrates the values of sustainable development, enhances the role of student eco-initiatives, and fosters partnerships between universities, communities, and businesses. *Key words:* STEM education, socio-ecological responsibility, sustainable development, youth, environmental awareness, interdisciplinary approach, project-based learning, motivation.

Постановка проблеми. Сучасне суспільство стикається з низкою глобальних викликів, серед яких особливо актуальними є поглиблення кліматичної кризи, деградація природного середовища, зростання соціальної нерівності. Тому виникає

потреба у формуванні покоління, здатного не лише усвідомлювати ці виклики, а й активно впливати на їх подолання. Стрімкий розвиток технологій вимагає від молоді не лише технічної грамотності, але й здатності діяти відповідально, етично, відповідно

до принципів сталого розвитку. У цьому контексті постає проблема інтеграції екологічних і соціальних цінностей у систему освіти, зокрема – в STEM-напрямок, який традиційно орієнтований на інновації, технології та міждисциплінарність [1].

STEM-освіта – це міждисциплінарний підхід до навчання, який інтегрує чотири ключові галузі: S – Science (наука); T – Technology (технології); E – Engineering (інженерія); M – Mathematics (математика). На відміну від традиційного предметного навчання, STEM передбачає комплексне вирішення реальних проблем, де здобувачі освіти застосовують знання одразу з кількох дисциплін у практичних ситуаціях [2]. Такий підхід сприяє розвитку системного мислення, інноваційності, критичного аналізу та творчого підходу до роботи.

Попри те, що STEM-освіта має значний потенціал у формуванні активної, мислячої та екологічно свідомої молоді, в освітній практиці України спостерігається фрагментарність підходів до поєднання технічних знань із соціально-екологічною відповідальністю. Бракує цілісних освітніх моделей, які б інтегрували екологічну проблематику в інженерні та науково-дослідні проекти, а також стимулювали студентів до участі в екологічно та соціально значущих ініціативах. Водночас рівень екологічної стурбованості серед молоді зростає, але не завжди трансформується у відповідальні дії через брак знань, навичок і прикладних можливостей.

Актуальність дослідження. Поєднання STEM-підходу з екологічним і соціальним вихованням є надзвичайно актуальним процесом і має важливе значення як для розвитку освіти, так і для сталого майбутнього суспільства.

Соціально відповідальна молодь є рушієм позитивних змін у суспільстві. Вона формує демократичну, толерантну та екологічну культуру. В умовах воєнного, екологічного, економічного тиску саме молодь часто стає ініціатором суспільної мобілізації та солідарності. У суспільствах із високим рівнем соціальної відповідальності молоді зростає рівень довіри та взаємодопомоги. Молоді люди, які беруть участь у волонтерстві, допомагають вразливим групам, підтримують один одного під час криз, створюють стійке до потрясінь суспільство.

У цьому контексті STEM-освіта розглядається не лише як засіб підготовки фахівців для інноваційної економіки, але й як платформа для формування громадянської та екологічної свідомості молоді. Поєднання технічного і гуманістичного компонентів освіти дає змогу забезпечити розвиток системного мислення, здатності до вирішення комплексних соціально-економічних та екологічних проблем, проєктного підходу до збереження навколишнього середовища.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Сучасна реформа вищої освіти в Україні та світі відбувається

в умовах глибоких соціально-економічних трансформацій, цифровізації, глобальних екологічних викликів та змін на ринку праці. Освіта більше не розглядається як процес передачі знань у традиційному розумінні, натомість формується нова модель, орієнтована на розвиток критичного мислення, інноваційної та громадянської активності [3].

У межах реформи вищої освіти України ключовими завданнями виступають: посилення міждисциплінарності навчальних програм; модернізація змісту освіти відповідно до глобальних викликів; інтеграція цифрових та інженерних технологій у навчальний процес; формування соціально-комунікативних навичок (soft skills) [4].

Тема STEM-освіти як інтеграційної моделі, що поєднує технічну підготовку з цінностями сталого розвитку, а також сприяє формуванню соціально-екологічної відповідальності молоді, напіву пов'язана з зазначеними завданнями. Таким чином, дане дослідження відповідає сучасним тенденціям освітньої реформи, запитам суспільства на екологічну безпеку та інтелектуальну самореалізацію молоді, а також сприяє реалізації державної політики у сфері сталого розвитку й екологізації освіти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останнього десятиліття у світі зростає інтерес до потенціалу STEM-освіти як інструменту для вирішення соціально-екологічних проблем. У працях J. Osborne [5], R.W. Bybee [6], M. Honey, G. Pearson [7] зазначається, що STEM-підхід може сприяти не лише розвитку технічних компетенцій, а й формуванню глобальної екологічної свідомості. Зокрема, проєктна діяльність у STEM сприяє залученню студентів до реальних проблем довкілля – забруднення, зміни клімату, енергетичної ефективності.

В Україні також активізувались наукові дослідження, присвячені розвитку STEM-підходу як складової інноваційної освітньої політики. Значну увагу цьому напрямку приділяють такі українські вчені, як Журавель Т.О., Соколова Н.О. [8], Балик Н.Р., Шмигер Г.П. [9], Олійник В.В., Самойленко О.М., Бацуровська І.В., Доценко Н.А. [10], які досліджують концептуальні засади STEM-освіти, її місце у формуванні компетентностей XXI століття та можливості інтеграції в систему загальної і вищої освіти.

З практичної точки зору, в Україні реалізуються освітні ініціативи, спрямовані на популяризацію STEM:

- інноваційний проєкт «Науково-методичне забезпечення STEM-освіти в закладах освіти» під егідою Міністерства освіти і науки України;
- STEM-школи, лабораторії майбутнього при деяких університетах;
- участь України в міжнародних освітніх програмах, таких як: Erasmus+, Horizon Europe, що передбачають STEM-підходи, мобільність, обміни та створення міжуніверситетських платформ.

Українські вчені також активно займаються вирішенням питання формування екологічної свідомості та культури молодого покоління. Серед провідних дослідників у цій сфері: Юрченко Л.І. [11], Карпенко Л.В. [12], Павленко І.Г. [13], та інші. У їхніх роботах розглядається екологічне виховання як інтегрована частина загального процесу освіти для сталого розвитку, що має охоплювати всі рівні освітньої системи, підкреслюється соціальна роль позанавчальної діяльності та участі молоді в екологічних акціях, форумах, волонтерстві як ефективного засобу підвищення рівня екологічної свідомості та активної громадянської позиції.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри зростаючу кількість досліджень у галузі STEM-освіти та праць, присвячених соціально-екологічному вихованню молоді, комплексне вивчення зв'язку між цими напрямками залишається недостатньо розробленим. Здебільшого акценти робляться або на технічних компетенціях, або на етичному компоненті без їх взаємопов'язаної реалізації в освітньому процесі.

Недостатньо вивченими залишаються питання практичної інтеграції екологічних і соціальних тем у STEM-програми. Також малодослідженим залишається емпіричний аспект – рівень зацікавленості молоді у STEM-проектах екологічного спрямування, їх мотивація до участі в соціально-екологічних ініціативах, бар'єри, що стримують їхню діяльність в контексті досягнення цілей сталого розвитку.

Новизна дослідження полягає у визначенні ролі STEM-освіти у формуванні соціально-екологічної відповідальності молоді, аналізі практик та освітніх інструментів, що сприяють розвитку екологічної свідомості та активної громадянської позиції у студентів, а також визначенні основних бар'єрів і перспектив інтеграції соціально-екологічного компоненту в STEM-підхід в умовах сучасної системи вищої освіти.

Методологічне та загальнонаукове значення. Методологічне значення проведеного дослідження полягає у розвитку міждисциплінарного підходу до аналізу взаємозв'язку між STEM-освітою та формуванням соціально-екологічної відповідальності молоді. У роботі обґрунтовано доцільність синтезу педагогічних, соціологічних, екологічних і технологічних парадигм у рамках цілісної моделі освіти, орієнтованої на сталий розвиток. Застосування системного та діяльнісного підходів дозволяє дослідити процес формування екологічної свідомості не лише як результат засвоєння знань, а як динамічну систему особистісних трансформацій, що відбуваються під впливом освітніх середовищ та практичної STEM-активності. Також зроблено акцент на проектно-орієнтованому навчанні як ефективному засобі інтеграції соціально-екологічної тематики в різні спеціальності.

Дослідження сприяє розвитку теорії освіти сталого розвитку, додає нові аспекти до концепції екологічної культури особистості, розширює розуміння можливостей STEM як не лише технічної, а й соціально-орієнтованої освітньої концепції.

Виклад основного матеріалу. Головними цілями STEM-освіти є: підготовка здобувачів освіти до викликів цифрової та інженерної епохи, розвиток їх здатності до інноваційної діяльності, виховання самостійності, ініціативності, навичок розв'язання складних задач, стимулювання інтересу до природничих і технічних наук та підвищення конкурентоспроможності молоді на ринку праці. Її ефективність значною мірою визначається принципами, на яких базується навчальний процес. Саме ці принципи відрізняють STEM від традиційного предметно орієнтованого підходу, формуючи у учнів і студентів не лише знання, а й навички, цінності та здатність до дій у складному світі [14]. Принципи STEM-освіти мають глибоке практичне і педагогічне значення, оскільки: сприяють формуванню інтегрованого наукового мислення, забезпечують зв'язок навчання з реальним життям, розвивають вміння працювати в команді, формують екологічну та соціальну відповідальність (рис. 1).

Іноді до STEM-дисциплін додають ще одну літеру – А (Arts), утворюючи концепт STEAM. Це підкреслює важливість мистецтва, дизайну, гуманітарного мислення в поєднанні з технічними знаннями. STEAM сприяє ще більш творчому, етичному та цілісному підходу до освіти.

Попри те, що STEM-освіта традиційно фокусується на технічних дисциплінах, сьогодні дедалі більше підкреслюється необхідність її гуманізації. Такий підхід особливо важливий для студентів технічних спеціальностей, адже саме вони створюватимуть інфраструктуру, продукти та технології майбутнього.

У студентів повинно формуватися розуміння соціального та екологічного контексту технічних рішень. Коли інженерні знання поєднуються з соціологією, екологією, економікою, правом, студенти починають бачити, як їхні технічні дії впливають на суспільство, довкілля, які мають наслідки для майбутніх поколінь. Це стимулює етичне мислення та відповідальність. Вивчення курсів, які базуються на аналізі соціальних явищ, екологічної політики, сталого розвитку, допомагає розвивати критичне ставлення до реальності, оцінювати рішення не лише за техніко-економічними параметрами, а й за гуманітарними. Крім цього виникає посилення емоційного залучення і емпатії, так як громадянська позиція базується не лише на знаннях, а й на цінностях, емоційній включеності, здатності до співпереживання і дії. Навчальні дисципліни з екологічної етики, комунікацій, соціальної справедливості допомагають майбутнім технічним фахівцям бачити за технологічними рішеннями людину з її проблемами,



Рис. 1. Основні принципи STEM-освіти

потребами та сподіваннями.

Коли студенти технічних спеціальностей працюють у командах з фахівцями з гуманітарних, економічних, природничих наук над реальними завданнями громади – це стимулює участь у громадському житті, волонтерстві, екологічних та соціальних ініціативах. Таким чином міждисциплінарна освіта вчить повазі до інших думок, вмінню вести діалог, аргументувати, приймати колективні рішення, що є ключовими навичками для активного громадянина в умовах демократії. Наприклад, студенти факультету комп'ютерних наук беруть участь у проєкті зі створення відкритої платформи моніторингу якості повітря. До команди входять також екологи, економісти та юристи. Такий міждисциплінарний проєкт не лише дає практичний досвід, а й розвиває соціальну чутливість, розуміння потреб громади та відповідальність за впроваджені рішення.

Успішна інтеграція соціально-екологічних тем у STEM-освіту можлива через такі ефективні інструменти:

- проєктну діяльність, що орієнтована на вирішення конкретних екологічних проблем (наприклад, розробка фільтрів для очищення води, енергоефективних моделей житла, переробки відходів тощо);
- використання кейсів, які демонструють негативні та позитивні наслідки технологічного втручання в природу;
- моделювання сталих систем – розробка розумних міст, екологічного транспорту, енергоощадних технологій;
- еко-хакатони, де здобувачі освіти працюють над реальними екологічними викликами разом із науковцями й інженерами (табл. 1).

Потужним засобом розвитку екологічної свідомості, відповідальності та соціальної дії у STEM-освіті виступає проєктна діяльність. При цьому відбува-

ється особистісна включеність студентів у реальні проблеми. Учасники проєктів стикаються з конкретною локальною або глобальною екологічною проблемою (наприклад, забруднення річки, перевитрата енергії в кампусі, відсутність сортування сміття). Це формує емоційно-мотиваційний зв'язок із темою та усвідомлення її актуальності. Молодь не просто спостерігає, а стає ініціатором змін – проводить вимірювання, аналізує дані, розробляє рішення [15]. Відчуття впливу на ситуацію формує відповідальність за результати власних дій. Робота в команді вчить розподіляти обов'язки, співпрацювати, долати конфлікти, підтримувати один одного – це основи соціальної відповідальності. Також розв'язання екологічних проблем через STEM-підхід вимагає поєднання технічних, біологічних, економічних та етичних знань, що допомагає молоді бачити екологію не як абстрактне поняття, а як життєвий вибір. Публічне представлення власного внеску в результаті розробки екологічного проєкту (на конференціях, конкурсах, у ЗМІ або в громаді) формує громадянську позицію, мотивацію до дії та усвідомлення соціального значення своїх зусиль. Це, в свою чергу, сприяє появі молодих лідерів у сфері екології, техніки та соціальних інновацій.

Останні соціологічні дослідження та спостереження в межах освітніх ініціатив свідчать, що інтерес студентської молоді до STEM-проєктів зростає. Міжнародний досвід показує, що останнім часом попит на професіоналів STEM-галузей, наприклад, у Європі стрімко зростає, і очікується, що він збільшиться ще на 8% у 2025 році, що значно перевищує середній прогнозований ріст зайнятості для всіх професій на 3%. STEM-освіта також є ключовою в моделі розвитку Нової української школи та підтримується державними та грантовими коштами [16]. Молодь активно долучається до проєктів еколо-

Таблиця 1

Приклади STEM-інструментів для формування екологічної свідомості та соціальної відповідальності студентів

№	Інструмент / метод	Приклад	Очікуваний результат
1	Проектно-орієнтоване навчання	Розробка системи збору дощової води для університетського корпусу	Усвідомлення ролі інженерних рішень у збереженні ресурсів
2	Експерименти екологічного спрямування	Аналіз мікропластику у воді з місцевих джерел за допомогою фільтрації та мікроскопії	Розвиток навичок дослідження, практичне розуміння екологічної загрози
3	STEM-хакатони	Участь у хакатоні за темою «Smart Eco-Campus»	Формування командних, креативних та інженерних компетентностей
4	Кейси в навчальних дисциплінах	Розрахунок вуглецевого сліду побутових звичок або кампусу з подальшими пропозиціями щодо його зниження	Навчання аналізу даних, екологічне мислення, практичні знання з фізики, хімії, математики
5	Еко-волонтерство на основі STEM	Створення мобільного додатку або бота для збору батарейок/пластику в громаді	Поєднання цифрових навичок з громадянською участю
6	Віртуальні лабораторії / симуляції	Використання симуляторів (PhET, Tinkercad, EcoChains) для моделювання процесів сталого розвитку	Розуміння складних екосистем, екологічних процесів та технологій без шкоди довкіллю
7	Курси за цілями сталого розвитку	Модульний курс «STEM для цілей сталого розвитку» -	Інтеграція екологічної, соціальної й технічної підготовки

гічного спрямування:

- екохакатонів, екомарафонів, інженерних змагань;
- створення цифрових інструментів для моніторингу стану довкілля (сенсори, мобільні додатки, платформи);
- розробки рішень у сферах енергоефективності, «зелених» технологій, сортування відходів тощо.

Проте ця зацікавленість часто є точковою, а не системною, і залежить від наявності підтримки з боку викладачів, партнерів, ресурсної бази.

Мотиваційні чинники участі молоді в соціально-екологічних ініціативах та STEM-експроєктах поділяються на внутрішні та зовнішні. Серед внутрішніх чинників можна відзначити: занепокоєність екологічними проблемами і бажання зробити внесок у захист довкілля; залучення до нових технологій, гаджетів, цифрових рішень; бажання бути корисним, ініціативним, визнаним [17]. Зовнішні чинники пов'язані з наявністю матеріального заохочення; підтримкою викладачів, менторів, адміністративних органів; можливістю отримати практичні навички, що пов'язані з майбутньою професією; участю у міжнародних освітньо-наукових програмах (рис. 2).

Попри високий потенціал у сфері інтеграції екологічної складової в STEM-підхід, активність студентів є все ще недостатньою і стикається з низкою перешкод, таких як низька екологічна обізнаність молоді, відсутність інтеграції в освітні програми змістових модулів або навчальних дисциплін зі сталого розвитку, відсутність сучасних лабораторій, обладнання, достатнього фінансування тощо

(табл. 2).

З метою підвищення зацікавленості молоді в STEM-експроєктах та залучення її до ініціатив сталого розвитку, доцільно:

- інтегрувати концепцію сталого розвитку до освітніх програм;
- створювати платформи підтримки студентських ініціатив (фінансової, менторської, технічної);
- запровадити обов'язкові STEM-модулі з екологічною орієнтацією в технічних закладах вищої освіти;
- посилити науково-дослідницьку діяльність студентів, пов'язану з локальними екологічними викликами;
- підтримувати партнерства університетів з громадами та бізнесом для спільного вирішення проблем.

Все зазначене наблизить вищу освіту до потреб XXI століття для гуманного, відповідального, орієнтованого на сталий розвиток суспільства.

Головні висновки. Проведене дослідження засвідчило, що STEM-освіта має значний потенціал у формуванні соціально-екологічної відповідальності молодого покоління, що особливо важливо в умовах сучасних глобальних викликів – кліматичних змін, ресурсного виснаження, соціальних конфліктів та технологічної нерівності. Поєднання технічної та математичної підготовки з екологічним і соціальним компонентом створює умови для виховання особистості, здатної не лише генерувати інновації, а й відповідально діяти в інтересах суспільства та довкілля.

У процесі аналізу було доведено, що класичні STEM-програми потребують доповнення гуманіс-

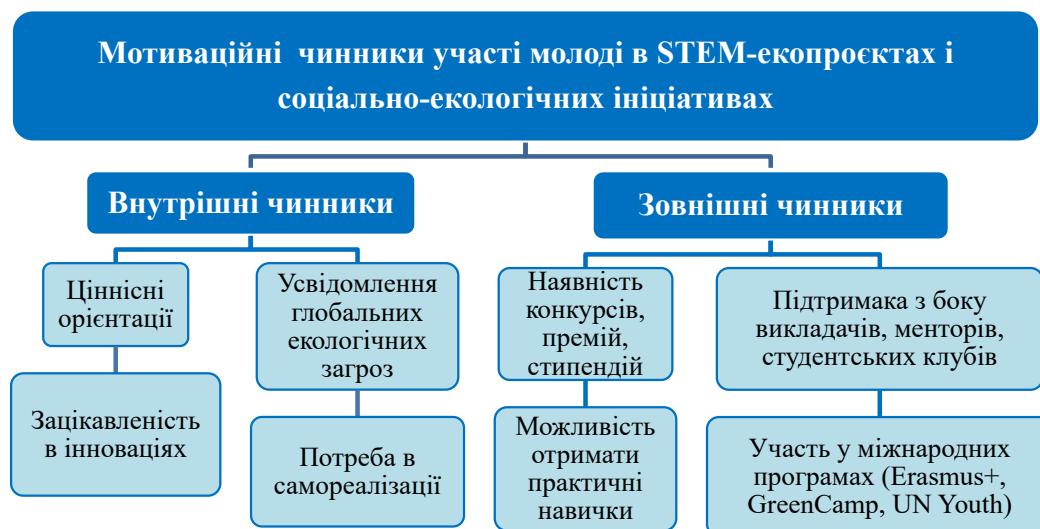


Рис. 2. Мотивація молоді до участі у STEM-екопроєктах та соціально-екологічних ініціативах

Таблиця 2

Бар'єри, що стримують формування соціально-екологічної відповідальності молоді

Бар'єр	Суть проблеми	Наслідок
Низька екологічна обізнаність	Студенти часто мають фрагментарні знання про екологічні проблеми, не бачать своєї ролі їх вирішенні.	Пасивність, знецінення участі в ініціативах
Відсутність інтеграції в навчальні програми	Теми сталого розвитку не завжди включені до STEM-курсів	Відокремлення екологічних проблем від спеціальності
Обмеження часу / перевантаження	Високе навчальне навантаження, паралельна робота	Неможливість долучитися до довгострокових проєктів
Недостатність ресурсної підтримки	Бракує обладнання, лабораторій, грантів, координації	Технічні обмеження, відсутність мотивації, відсутність фінансування
Відсутність партнерств та менторства	Брак зв'язку з бізнесом, громадами, науковими установами	Студенти не бачать реального впливу своїх проєктів

тичним, екологічним та громадянським змістом. Інтеграція екологічних тем у проєктне навчання, створення міждисциплінарних освітніх курсів, впровадження ініціатив, орієнтованих на досягнення цілей сталого розвитку, – усе це сприяє підвищенню екологічної свідомості та соціальної активності молоді. Практичні результати STEM-екопроєктів (моніторинг стану довкілля, енергозбереження, розробка екологічних пристроїв) показують високу ефективність такого підходу як освітнього, так і виховного інструменту.

Водночас виявлено низку бар'єрів, які стримують розвиток цього напрямку: недостатнє методичне праці та очікуванням нових поколінь.

забезпечення, брак міждисциплінарних команд викладачів, слабе фінансування студентських STEM-екопроєктів, а також обмежене розуміння зв'язку між технічними знаннями та соціальною відповідальністю. Подолання цих проблем вимагає активної підтримки з боку освітньої політики, інтеграції STEM-підходу в екологічну стратегію освіти, а також розробки нових освітніх програм і навчально-методичних матеріалів.

Таким чином, обґрунтовано доцільність і необхідність трансформації STEM-освіти в напрямі соціально-екологічної інтеграції, що відповідає потребам сталого розвитку, вимогам сучасного ринку

Література

1. Bascopé M, Reiss K. Place-Based STEM Education for Sustainability: A Path towards Socioecological Resilience. *Sustainability*. 2021. № 13(15). 8414.
2. Сльникова Г. STEM-освіта в контексті адаптивного підходу. *Адаптивне управління: теорія і практика. Серія: Педагогіка*. 2018. Вип. 4(7). URL: <https://amtp.org.ua/index.php/journal/article/view/11/7>.
3. Pahnke J., O'Donnell C., Bascopé M. Using Science to Do Social Good: STEM Education for Sustainable Development. In

- Proceedings of the Position Paper Developed in Preparation for the Second «International Dialogue on STEM Education» (IDoS), Haus der Kleinen Forscher, Berlin, 2019.
4. Татарінов В., Татарінов С. Реформи вищої освіти та проблеми їх реалізації в Україні. *Академічний огляд*. 2020. № 1. С. 60–71.
 5. Osborne J. Arguing to Learn in Science: The Role of collaborative, Critical Discourse. *Science*. 2019. № 328. P. 463–466.
 6. Bybee R. W. The Case For STEM Education Challenges and Opportunities. NSTApress, 2013. 130 p.
 7. Honey M., Pearson G., & Schweingruber H. STEM Integration in K-12 Education: Status, Prospects, and an Agenda for Research. *National Academy of Engineering; National Research Council*. Washington, DC: The National Academies Press, 2014. 180 p.
 8. Журавель Т.О., Соколова Н.О. Інтегроване навчання – основний складник STEM-освіти. *Освіта та розвиток обдарованої особистості*. 2016. № 12 (55). С. 32–34.
 9. Балик Н.Р., Шмигир Г.П. Підходи та особливості сучасної STEM освіти. *Фізико-математична освіта*. 2017. Вип. 2(12). С. 26–30.
 10. Олійник В.В., Самойленко О.М., Бацуровська І.В., Доценко Н.А. STEM-освіта в системі підготовки майбутніх інженерів. *Інформаційні технології і засоби навчання*. 2020. Том 80, № 6. С. 127–139.
 11. Юрченко Л.І. Екологічна культура в контексті екологічної безпеки : монографія. Київ: Вид-во ПАРАПАН, 2008. 296 с.
 12. Карпенко Л.В. Екологічна свідомість студентської молоді як складова сталого розвитку суспільства. *Педагогіка і психологія професійної освіти*. 2017. № 1. С. 33–37.
 13. Павленко І.Г. Творча активність у формуванні екологічної культури студентів ЗВО. *Вісник Луганського національного університету імені Тараса Шевченка. Педагогічні науки*. 2019. № 1(324). Ч. I. С. 138–146.
 14. Оліференко Т., Цветкова Г. Концептуальні засади розвитку STEM-освіти в Україні. *Вища освіта України*. 2020. № 1. С. 61–67.
 15. Літвак О.А. Вища освіта як ефективний інструмент впровадження принципів зеленої економіки. *Наука і техніка сьогодні*. 2024. № 8(36). С. 301–315.
 16. Кучеровська В. STEM у Євросоюзі та Україні: цифри й факти. 12.09.2024. URL: <https://osvita.ua/blogs/93024/>.
 17. Грень Л. М. Забезпечення мотивації досягнення професійного успіху у студентів ВТНЗ. *Педагогічний альманах*. 2011. № 9. С. 121–125.

Дата першого надходження рукопису до видання: 04.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЦИФРОВА ЕКОЛОГІЯ: МІЖДИСЦИПЛІНАРНЕ ОСМИСЛЕННЯ ОБ'ЄКТА, ПРЕДМЕТА І МЕТОДОЛОГІЇ

Муха Р.Б., Гнєзділова В.І.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Галицька, 201Б, 76008, Івано-Франківськ
roman.mukha@pnu.edu.ua, viktoria.gniedzilova@pnu.edu.ua

Сучасна цифрова трансформація, охоплюючи медіа, соціальні мережі та штучний інтелект, формує нове середовище, яке впливає на поведінку людини та соціальних груп, на комунікацію та соціальні структури, породжуючи виклики, такі як, впливи на політичні процеси, соціальна напруженість, інформаційне перевантаження, дезінформація та цифрова тривога. У цьому контексті виникає потреба в новій міждисциплінарній науці – цифровій екології, яка досліджує взаємодію людини з цифровим середовищем, а також вивчає наслідки та закономірності цієї взаємодії. Поточні дослідження в цій галузі є фрагментарними, відслідковується брак системного підходу. В Україні цифрова екологія має особливе значення через потоки дезінформації в умовах гібридної війни. Цифрова екологія є новою галуззю знань, в якій вивчається та систематизується досвід взаємодії людини та інформаційного середовища в сучасному світі. Вона пропонує цілісний підхід до аналізу інформаційних викликів, сприяючи розробці програм медіаграмотності, цифрової гігієни та політики безпеки.

Стаття спрямована на визначення об'єкта, предмета та методології цифрової екології як нової міждисциплінарної науки, що досліджує взаємодію людини з інформаційно-цифровим середовищем. Авторами використано системний аналіз, методи цифрової антропології, соціологічні та психологічні підходи для вивчення інформаційно-цифрового середовища як особливої екосистеми. У статті запропоновано визначення об'єкту цифрової екології, як інформаційно-цифрового середовища (технічні та соціальні системи), а також предмету цифрової екології, як процесу взаємодії людини з цим середовищем. Методологія дослідження інтегрує соціологічні, психологічні та обчислювальні методи. Сучасне цифрове середовище створило нову реальність, яку вчені і суспільство не можуть усвідомити і тим більше спрогнозувати наслідки цих змін. Стаття закладає основу для подальших досліджень впливу цифрового середовища на суспільство. *Ключові слова:* цифрова екологія, інформаційне перевантаження, дезінформація, інформаційно-цифрове середовище, соціальні мережі, медіаграмотність.

Digital ecology: an interdisciplinary reflection on its object, subject and methodology. Mukha R. Gniedzilova V.

The ongoing digital transformation, encompassing media, social networks, and artificial intelligence, is reshaping the environment in which individuals and social groups operate. This transformation profoundly influences human behavior, communication practices, and social structures, while simultaneously generating complex challenges such as political polarization, social tensions, information overload, disinformation, and digital anxiety. Within this context, there emerges a pressing need for a new interdisciplinary field – digital ecology – which aims to examine the interactions between humans and the digital environment, and to investigate the patterns and consequences of these interactions. Current research in this field remains fragmented, revealing a lack of a systematic approach. In Ukraine, digital ecology holds particular significance due to the influx of disinformation amid the conditions of hybrid warfare. Digital ecology is an emerging field of knowledge that studies and systematizes the human experience of interaction with the informational environment in the modern world. It offers a holistic framework for analyzing informational challenges and contributes to the development of media literacy programs, digital hygiene practices, and security policies.

This article aims to define the object, subject, and methodology of digital ecology as a new interdisciplinary science that explores human interaction with the information-digital environment. The authors employ systems analysis, methods of digital anthropology, as well as sociological and psychological approaches to study the information-digital environment as a distinct ecosystem. The article proposes a definition of the object of digital ecology as the information-digital environment, encompassing both technical and social systems, and defines its subject as the process of human interaction with this environment. The research methodology integrates sociological, psychological, and computational methods. The modern digital environment has created a new reality that neither scholars nor society at large are fully able to comprehend, let alone predict its consequences. This article lays the foundation for further research on the impact of the digital environment on society. *Key words:* digital ecology, information overload, disinformation, information-digital environment, social media, media literacy.

Постановка проблеми. Сучасний світ переживає цифрову трансформацію, яка кардинально змінює спосіб існування людини та суспільства. Цифрові технології, від всіх сучасних видів ЗМІ і соціальних мереж до штучного інтелекту, формують нову реальність – інформаційно-цифрове середовище, яке впливає на комунікацію, поведінку, світогляд і соціальні структури. Це середовище породжує не лише нові можливості, але й виклики: інформаційне перевантаження, дезінформацію, інформаційні буль-

башки, цифрову тривогу та зміну соціальних взаємозв'язків. Інформація впливає не тільки на поведінку і світогляд людини, але й на взаємозв'язки між популяціями та всередині них. У цьому контексті виникає потреба в новій міждисциплінарній науці – цифровій екології, яка досліджує взаємодію людини з цифровим середовищем, а також вивчає наслідки та закономірності цієї взаємодії.

Цифрова екологія, як наука, потребує чіткого визначення об'єкта (інформаційно-цифрове середо-

вище як комплекс технічних і соціальних систем), предмета (процеси взаємодії людини з цим середовищем) та методології (інтеграція соціологічних, психологічних і комп'ютерних методів). Проблема полягає в тому, що сучасні дослідження часто фрагментарні, зосереджені на окремих аспектах (наприклад, ментальне здоров'я чи дезінформація), але бракує системного підходу. Ця стаття має на меті заповнити цю прогалину, запропонувавши цілісне бачення цифрової екології.

Актуальність дослідження. Актуальність теми зумовлена стрімким зростанням інформаційних потоків, які формують нову реальність існування людини. Револьюційні зміни у сучасному інформаційному середовищі підтверджуються рядом авторитетних досліджень. Мануель Кастельс у своїй трилогії «Інформаційна ера» (1996-1998) стверджує, що ми вступили в нову фазу соціального розвитку – мережеве суспільство, де ключовим ресурсом є інформація, а основною формою організації – мережа. Ці зміни трансформують усі сфери людського життя [1].

Німецький соціолог Андреас Реквітц у праці «Суспільство сингулярностей» (2019) підкреслює, що цифрові медіа створюють нові режими сприйняття, взаємодії й самоусвідомлення. Людина занурюється в середовище візуальних, текстових і звукових потоків, які постійно переформатовують її досвід [2].

Згідно з сучасними оцінками, зробленими на основі відкритих джерел, у 1925 році обсяг щоденної інформації, яку людина обробляла, становив приблизно 0,01 – 0,03 гігабайта на добу (тобто

10 – 30 мегабайтів) – здебільшого завдяки друкованій пресі, радіо та епізодичному перегляду фільмів. У 2025 році цей показник зріс до 34 – 74 гігабайтів на добу й охоплює мобільний інтернет, соціальні мережі, стрімінг відео, цифрову роботу, рекламу, електронну пошту тощо.

Рисунок 1 ілюструє стрімке зростання, що перевищує 1000-кратне навантаження порівняно з початком XX століття, і демонструє, чому феномен інформаційного перенасичення потребує системного аналізу в рамках цифрової екології.

За прогнозами Statista (2024), у 2025 році обсяг глобальних даних досягне 180 зетабайт, а кількість користувачів соціальних мереж перевищить 5 мільярдів [3]. Цифрові платформи, алгоритми та штучний інтелект створюють незліченну кількість контенту, серед якого фейки та інформаційні бульбашки, які обмежують доступ до об'єктивної інформації, сприяють поляризації соціальних груп та поширенню дезінформації.

Цифрове середовище впливає на психіку, викликаючи цифрову тривогу та когнітивне перевантаження. Дослідження Американської психологічної асоціації (APA, 2021) показало, що 70% американців відчувають стрес через надвеликі інформаційні потоки, а 40% повідомляють про зниження концентрації через багатозадачність у цифровому середовищі [4]. У глобальному контексті цифрова трансформація змінює соціальні структури, послаблюючи традиційні інститути (сім'я, громада) і формуючи мережеве суспільство.

В Україні цифрова екологія набуває особливо важливого значення в умовах гібридної війни, де

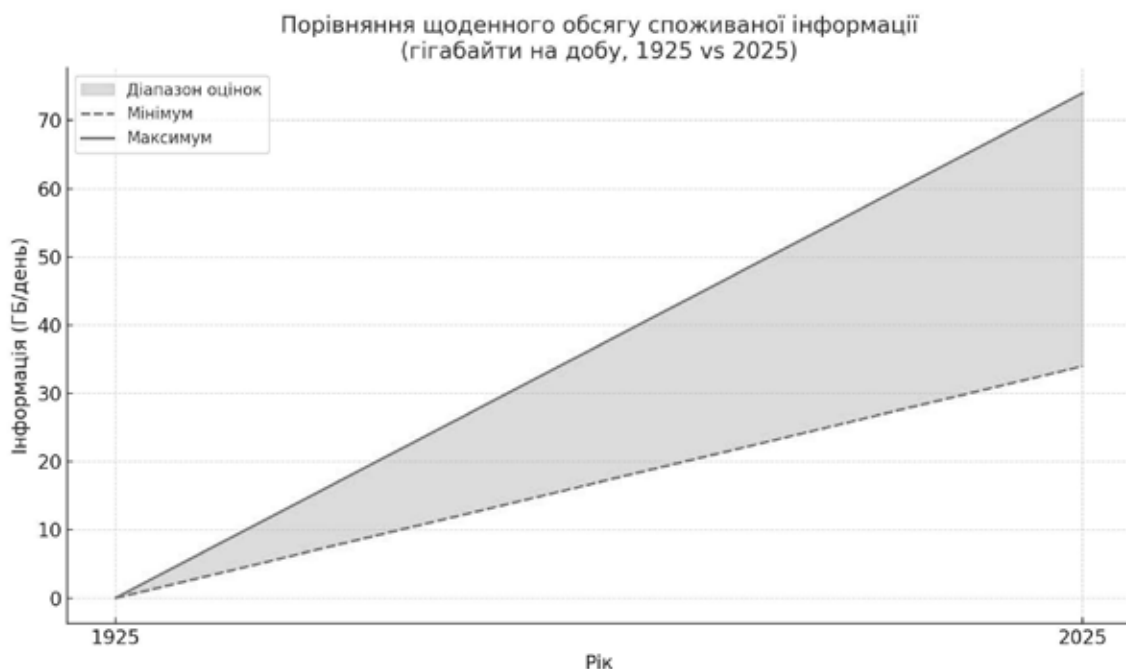


Рис. 1. Порівняння щоденного обсягу споживаної інформації однією людиною за останні 100 років

дезінформація та інформаційні маніпуляції є інструментами впливу на поведінку людей і спільнот. Звіт Detector Media (2023) показує, що абсолютна більшість українців стикалися з фейковими новинами у 2022 – 2024 роках. Цей звіт виявляє тисячі деструктивних повідомлень у соцмережах та сотні дезінформаційних кампаній та ПСГО щороку [5].

Таким чином, цифрова екологія є новою галуззю знань, в якій вивчається та систематизується досвід взаємодії людини та інформаційного середовища в сучасному світі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Ця стаття пропонує міждисциплінарний підхід до цифрової екології, інтегруючи ідеї з інформаційної екології [6], соціології, кіберсоціології, філософії та психології. Наукове значення полягає у формуванні нової дисципліни, яка систематизує знання про взаємодію людини з цифровим середовищем. Практичне значення розвитку цифрової екології включає: розробку програм цифрової освіти та медіаграмотності, створення етичних стандартів для цифрових платформ, формування політики цифрової безпеки для протидії дезінформації. Окремим практичним наслідком цифрової екології повинно стати розроблення системи цифрової гігієни, під яким ми розуміємо здатність людини свідомо управляти своїм цифровим середовищем, захищати особисті дані, уникати кіберзагроз і зберігати психічне здоров'я в умовах інтенсивного інформаційного потоку.

Розвиток цифрової екології також сприяє вирішенню сучасних викликів, таких як інформаційна нерівність, цифрова тривога та соціальна поляризація, що робить його актуальним для науки та суспільства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифрова екологія як наука активно розвивається, поєднуючи ідеї з різних дисциплін. Термін «цифрова екологія» поступово сформувався як міждисциплінарне поняття у 2000-х роках на стику медіадосліджень, соціології, екології, цифрової антропології та інформаційної безпеки. Найвідомішими першими згадками цього терміну є Miller (2011) у книзі Understanding Digital Culture, де він зазначає, що медіа-середовище – це екосистема, яка впливає на поведінку, комунікацію та культуру людини та людських популяцій [7]. Н. Jenkins (2006), автор поняття «конвергентної культури», також описує цифрове середовище як взаємопов'язану систему, близьку до екологічного підходу [8]. Ніл Селвін (2011, 2016) розглядає цифрову екологію як соціальне середовище, що формує освітній досвід [9, 10]. Мануель Кастельс (1996 – 1998) у трилогії «Інформаційна ера» описує мережеве суспільство, де інформація є ключовим ресурсом, а цифрові мережі змінюють соціальні структури [1]. Його ідеї доповнює Андреас Реквітц (2019), який аналізує, як цифрові медіа формують нові режими сприйняття та самоусві-

домлення [2]. Питання інформаційного перевантаження досліджують Bawden & Robinson (2009), вводячи концепцію «інформаційного перевантаження» [11]. Дослідження Орбен та Пшибильського (2019) підтверджує, що цифрове середовище викликає когнітивне та емоційне перевантаження [12]. Дезінформація та інформаційні бульбашки є центральними темами прикладних досліджень динаміки цифрового середовища та його впливу на поведінку людини.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри активний розвиток досліджень цифрової екології, залишаються нерозв'язаними питання формування чітких методологічних підходів до її вивчення, а також визначення об'єкта і предмета дослідження. Не розроблені комплексні системні моделі, які б дозволили врахувати міждисциплінарність проблеми та взаємозв'язок її компонентів. Відсутність чіткого визначення об'єкта та предмета цифрової екології. Недостатня увага до соціокультурних і психологічних наслідків дезінформації та інформаційних бульбашок. Обмеженість досліджень у локальному контексті України, де дезінформація має специфічні прояви через гібридну війну. Ця стаття спрямована на подолання цих прогалин через системний міждисциплінарний підхід.

Новизна. У цій статті запропоновано системний міждисциплінарний підхід до цифрової екології, що інтегрує знання з інформаційних технологій, екології, психології, соціології та філософії. «Цифрова екологія» визначається як система знань, що досліджує взаємодію людини і цифрового середовища, в якому вона існує, враховуючи технічні, соціокультурні, психологічні та екологічні аспекти. Авторами виділено об'єкт та предмет цифрової екології. Об'єкт – цифрове інформаційне середовище як комплекс технічних, технологічних, комунікаційних і соціокультурних систем, що формують умови існування людини. Предмет – процеси взаємодії людини з цифровим середовищем, їх вплив на психофізіологічний стан, соціальні відносини та поведінку людини і людських популяцій.

Методологія. Дослідження базується на інтеграції методів системного аналізу, соціологічного опитування, психологічного тестування та експериментальних досліджень. Застосовано методи цифрової антропології, що дозволяють аналізувати цифрову поведінку та середовище як цілісну екологічну систему.

Основний матеріал. Інформація в сучасному світі перетворилась з ресурсу у фактор середовища, що впливає на психіку людини, культуру, соціум та політику. Цифрова екологія досліджує інформаційно-цифрове середовище як складну екосистему, що включає технічні (апаратне забезпечення, алгоритми, ШІ), соціальні (соцмережі, онлайн-спільноти) та інформаційні (дані, контент) компоненти. Це середовище трансформує когнітивні процеси людини, соці-

альні структури, поведінку та світогляд, створюючи виклики: інформаційне перевантаження, дезінформація, інформаційні бульбашки, цифрова тривога, зміна соціальних взаємозв'язків, зміна світогляду та системи цінностей.

Інформаційне перевантаження є одним із найбільш актуальних і ключових викликів. За даними дослідження програми *How Much Information?* (UCSD, 2009), середній американський користувач споживав в період досліджень приблизно 34 ГБ інформації на день, що еквівалентно близько 100 500 слів [13]. Сучасні оцінки, що базуються на інформації отриманій з відкритих джерел, показують зростання щоденного споживання інформації кожною людиною від 30 до 70 ГБ в день. Це призводить до зниження концентрації та когнітивного стресу. APA (2021) показує, що переважна більшість користувачів Інтернету відчуває труднощі з фокусуванням, а значна частина – навіть «паралізіс аналізу» [4]. У теорії цифрової екології актуально розглядати явище інформаційного перевантаження як ключовий тренд цифрового середовища. Як констатується в останніх дослідженнях, «інформаційне перевантаження – це надмірна кількість інформації при обмежених когнітивних можливостях сприймача» [14]. Натомість сучасна емпірична аналітика встановила факти про те, що: «цифрове перевантаження ... призводить до психостресу та емоційного виснаження» [15].

Особливо вразливими до інформаційного перевантаження є вікова група підлітків. Meta-аналіз (Боєрс, 2022) приводить наступний висновок: «Підлітки з вищим середньоденним часом перебування в соцмережах мали на 59,7 % вищий ризик депресії порівняно з тими, хто менше користувався соцмережами. З кожною додатковою годиною використання соцмереж ризик депресій зростав на 13 %» [16]. У дослідженні (Richm, 2019, JAMA Psychiatry) досліджувалась вибірка з 6595 підлітків (12-15 років), які проводили тривалий час у соцмережах (порівняно з відсутністю використання), виявлено наступні закономірності: користування соцмережами від 3 до 6 годин щоденно значно підвищує ризик внутрішніх проблем у підлітків (анксіозність, депресія) [17]. Є також інші дослідження (Твендж, 2017), які підтверджують, що тривале використання соцмереж (рівне або більше 3 годин) пов'язане зі збільшенням ризику депресивних симптомів на 60 % [18].

Ще один тренд, що наростає у сучасному цифровому середовищі – це необхідність постійно перемикатись між завданнями і джерелами інформації. Цей термін має назву «багатозадачність» і описується, як постійна потреба бути онлайн, слідкувати за інформацією, взаємодіяти, швидко реагувати та приймати важливі рішення. Багатозадачність стосується не тільки тих, хто працює в мережі інтернет, вона поширюється на звичайні професії, як напри-

клад водіїв, які користуються навігаторами та виконують завдання із центрального офісу. Насправді перелік професій що вимагають багатозадачності включає більшість сучасних професій які передбачають виконання своїх безпосередніх завдань в поєднанні з необхідністю коригувати свої дії з управлінською ланкою в режимі реального часу. Крім того поза межами роботи більшість людей у сучасному світі теж вимушені стикатись із багатозадачністю. Це викликає психологічне й емоційне виснаження: дратівливість, тривога, порушення сну, помилкова оцінка інформації. Експеримент Стенфорда (2009) із методикою Stroop показав, що багатозадачність у цифровому середовищі знижує продуктивність [19]. Приклад дослідження Інституту інформатики УЦІР показує: постійне чергування між задачами підвищує помилковість, уповільнює виконання завдань і викликає стрес: підвищення кров'яного тиску та серцевого ритму. Стенфордське дослідження доводить, що багатозадачність знижує ефективність, продуктивність та IQ. Зокрема, IQ знижується до рівня 8-річної дитини під час складних цифрових задач. У дослідженні з віковими когортами виявлено, що в учасників старшого віку багатозадачність значно підвищує фізіологічний рівень стресу.

У сучасному цифровому середовищі існує також ряд глобальних загроз, які можуть вплинути не тільки на ментальне і фізичне здоров'я людини, але й призвести до соціальних потрясінь і конфліктів. Одним із найбільш небезпечних явищ є дезінформація. Wardle & Derakhshan (2017) визначають її як навмисне поширення неправди [20]. У сучасному світі лавиноподібно зростає кількість цифрових акаунтів, груп і платформ, що поширюють фейкові новини, ворожу пропаганду, а також займаються маніпуляцією громадською думкою. Wardle & Derakhshan (2017) класифікують дезінформацію як глобальну загрозу з таких ключових причин: 1. Дезінформація свідомо використовується для впливу на вибори, маніпуляцій громадською думкою та послаблення довіри до демократичних інституцій. 2. Завдяки цифровим технологіям, неправдиві повідомлення поширюються миттєво через соцмережі, месенджери й онлайн-медіа. Це робить фейкову інформацію важкоконтрольованою. 3. У добу інформаційного перевантаження людям важко відрізнити правду від фейку. Це призводить до втоми, зневіри й апатії, а отже, і до втрати критичного мислення. 4. Фейкова інформація часто апелює до емоцій, страху й гніву. Це поглиблює поділ у суспільстві, провокує агресію, ксенофобію, расизм або насильство [20].

В Україні в умовах війни дезінформація є зброєю, спрямованою проти національної безпеки. У звіті *Detector Media* (2023) згадується, що було виявлено 83 ворожі TikTok-канали і 449 Telegram-каналів, які поширювали численні фейки і містили маніпулятивні наративи. Цей потік дезінформації мав на меті послаблення обороноздатності країни, зростання

недовіри до дій влади і Збройних Сил України, посилення соціального напруження, а також погіршення психоемоційного стану громадян країни [5].

Загальним негативним трендом розвитку інформаційного середовища у світі є феномен «інформаційних бульбашок». Це системне явище виникає, коли людина отримує новини, думки та контент лише з обмеженого кола джерел, що підтверджують її погляди, і не стикається з альтернативними думками чи фактами. Такі платформи, як Facebook, Instagram, TikTok, YouTube та інші, показують користувачам контент, який їм подобається, базуючись на вподобаннях, переглядах і підписах. Це створює замкнуте коло, коли користувач бачить лише «свою» точку зору. Це явище описується в роботі Pariser The Filter Bubble (2011): «Ця нова тенденція – справжня невидима революція у способі споживання інформації, коли ми отримуватимемо переважно новини, які приємні, знайомі й підтверджують наші переконання, залишаючи менше простору для несподіваних зустрічей з реальною інформацією» [21]. Цю думку розвиває і підсумовує Санстейн (2017), стверджуючи, що цей небезпечний феномен розриває доступ до різноманіття думок, що має критичне значення для демократії. «Фільтрові бульбашки, наприклад, створюють інформаційні силоси, підсилюють дезінформацію й сприяють ненависті та екстремізму» [22].

Сучасне цифрове середовище дійсно створило нову реальність, яку вчені і тим більше суспільство не можуть усвідомити і тим більше спрогнозувати наслідки цих змін. Кастельс (1996) описує перехід до мережевого суспільства, де традиційні інститути втрачають вплив [1]. Якщо в минулому основними інституціями виховання молодого покоління були сім'я і навчальні заклади, то сьогодні вони мають усе менший вплив на формування світогляду дітей та молоді. «Ідентичність тепер дедалі більше вибудовується в інформаційних мережах – у віртуальних спільнотах, а не в традиційних локальних інститутах» [1]. Це означає, що молодь шукає приналежність у нових середовищах, які не є інституційно контрольованими (школа, батьки). Крім того, інформаційні потоки більше не контролюються ні державою, ні навіть приватними ЗМІ, які підпорядковуються законодавству країн і моральним нормам

суспільства: «Інформація циркулює поза контролем держави, родини або школи» [1]. В підтвердження цього можна привести дослідження, які проводились в нашій країні. За їхніми підсумками, офіційні ЗМІ вже не мають домінуючого впливу на громадську думку. Наприклад, в Україні Telegram вважається найпопулярнішою платформою для оперативної інформації, особливо серед молоді. Згідно даних з джерела ІМІ щодо використання Telegram серед українців у 2024 році: 81 % опитаних користується Telegram для спілкування з близькими або друзями, 73 % опитаних отримують новини через Telegram, 65 % довіряють інформації в Telegram-каналах, які вони читають регулярно [23]. Це означає, що поширення інформації та наративів серед молоді не є контрольованими, а зміст інформації яка поширюється часто навіть не є відомим, тому наслідки від впливу інформації на користувачів не є передбачуваними.

Висновки. Цифрова екологія є міждисциплінарною наукою, що досліджує інформаційно-цифрове середовище як екосистему, яка трансформує людину та суспільство. Як і будь-яка інша наука, цифрова екологія має об'єкт, предмет та методологію дослідження. Об'єктом – є інформаційно-цифрове середовище (технічні, соціальні, інформаційні компоненти). Предметом – взаємодія людини з середовищем, що впливає на когнітивні процеси, поведінку, соціальні структури, світогляд. А методологія використовує такі підходи, як системний аналіз, соціологічні, психологічні, комп'ютерні методи що дозволяють досліджувати цифрові виклики.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати цього дослідження можуть бути використані для створення та впровадження програм медіаграмотності, щоб протидіяти дезінформації, політики інформаційної безпеки, цифрової гігієни, а саме вироблення рекомендацій щодо споживання інформаційних потоків, етичних стандартів роботи цифрових платформ, принципів доброчесного використання штучного інтелекту.

Майбутні дослідження можуть стосуватись багатьох напрямків цифрової екології. Наприклад, вплив штучного інтелекту на людину і соціум, регуляція інформаційних потоків, локальні аспекти цифрової екології.

Література

1. Castells M. The Information Age: Economy, Society and Culture. Oxford: Wiley Blackwell, 2010. 1488 p. ISBN 978-0-631-22140-1.
2. Reckwitz A. The society of singularities. Cambridge: Polity Press, 2020. 280 p. DOI: 10.1111/1468-4446.12795.
3. Statista. *Global Data Volume Forecast 2025*: веб-сайт. URL: <https://www.statista.com>. (дата звернення: 12.06.2025).
4. Stress in America 2021: Digital Overload. *American Psychological Association*: веб-сайт. URL: <https://www.apa.org/news/press/releases/stress/2021/decision-making-october-2021.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Дезінформація в українському медіапросторі 2022-2024. *Детектор Медіа*: веб-сайт. URL: https://detector.media/doc/2023_disinformation_report. (дата звернення: 7.06.2025).
6. Nardi B., O'Day V. Information Ecologies: Using Technology with Heart. Cambridge: MIT Press, 1999. 232 p.
7. Miller V. Understanding Digital Culture. London: SAGE Publications, 2011. 254 p.
8. Jenkins H. Convergence Culture: Where Old and New Media Collide. New York: NYU Press, 2006. 308 p.

9. Selwyn N. Schools and schooling in the digital age: a critical analysis. London: Routledge, 2011. 192 p.
10. Selwyn N. Is technology good for education? Cambridge: Polity Press, 2016. 126 p.
11. Bawden D., Robinson L. The dark side of information: Overload, anxiety and other paradoxes. *Journal of Information Science*. 2009. Vol. 35, № 2. P. 180-191. DOI: 10.1177/0165551508095781.
12. Orben A., Przybylski A. K. The association between adolescent well-being and digital technology use. *Nature Human Behaviour*. 2019. Vol. 3, № 2. P. 173-182. DOI: 10.1038/s41562-018-0506-1.
13. Bohn R., Short J. How Much Information? 2009 Report on American Consumers. San Diego: University of California, 2009. 36 p. URL: hmi.ucsd.edu/pdf/HMI_2009_ConsumerReport_Dec9_2009.pdf. (дата звернення: 18.06.2025).
14. Moko A., Victor-Ikoh M., Okardi B. Information overload: a conceptual model. *European Journal of Computer Science and Information Technology*. 2023. Vol. 11, № 5. P. 19–29. DOI: 10.37745/ejcsit.2013/vol11n51929.
15. Li J., Sun X., Wang Y., Jiang Y., Gao Q. Associations between social media use and mental health among adolescents: A scoping review. *BMC Public Health*. 2025. Vol. 25, Article number: 698. DOI: 10.1186/s12889-025-22698-0.
16. Boers E., Afzali M. H., Newton N., Conrod P. Association of screen time and depression in adolescence. *JAMA Pediatrics*. 2019. Vol. 173, № 9. P. 853–859. DOI: 10.1001/jamapediatrics.2019.1759.
17. Riehm K. E., Feder K. A., Tormohlen K. N., Crum R. M., Young A. S., Green K. M., Pacek L. R., La Flair L. N., Mojtabai R. Associations between time spent using social media and internalizing and externalizing problems among US youth. *JAMA Psychiatry*. 2019. Vol. 76, № 12. P. 1266–1273. DOI: 10.1001/jamapsychiatry.2019.2325.
18. Twenge J. M. iGen: Why Today's Super-Connected Kids Are Growing Up Less Rebellious, More Tolerant, Less Happy-and Completely Unprepared for Adulthood: and What That Means for the Rest of Us. New York, NY: Atria Books, 2017. 342 p.
19. Ophir E., Nass C., Wagner A. D. Cognitive control in media multitaskers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2009. Vol. 106, № 37. P. 15583–15587. DOI: 10.1073/pnas.0903620106.
20. Wardle C., Derakhshan H. Information disorder: Toward an interdisciplinary framework for research and policy making. Strasbourg: Council of Europe, 2017. 47 p.
21. Pariser E. The Filter Bubble: What the Internet Is Hiding from You. New York: Penguin Press, 2011. 294 p.
22. Sunstein C. R. #Republic: Divided Democracy in the Age of Social Media. Princeton: Princeton University Press, 2017. 328 p. DOI: 10.1086/696988.
23. Медіаспоживання в Україні 2024. Інститут масової інформації: веб-сайт. URL: <https://imi.org.ua/monitorings/mediaspogivannya-in-ukraine-2024/> (дата звернення: 18.06.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

СУЧАСНІ МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ РЕКРЕАЦІЙНИХ ЗОН

Сакун А.О., Єрмаков Ю.Ю.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

Antonina.Sakun@khpi.edu.ua, yurii.yermakov@mit.khpi.edu.ua

У сучасних умовах стрімкого зростання рекреаційного та антропогенного навантаження на природні території особливої актуальності набуває впровадження ефективних підходів до оцінки їх екологічного стану. Зміни, спричинені урбанізацією, розвитком інфраструктури та зростанням туристичної активності, мають суттєвий вплив на екосистеми, що функціонують у межах рекреаційних зон. У таких умовах виражене оцінювання стану цих територій є не лише науково обґрунтованою необхідністю, а й ключовим елементом у процесі забезпечення екологічної рівноваги та сталого природокористування. Саме систематичне та комплексне вивчення параметрів довкілля дозволяє виявляти ранні ознаки деградації, прогнозувати можливі ризики та розробляти адаптаційні заходи для збереження природних ландшафтів.

Сучасні підходи до екологічного моніторингу включають як традиційні методи польових досліджень, так і новітні технології – дистанційне зондування Землі, використання геоінформаційних систем, біоіндикаторів та математичного моделювання. Вони дають змогу отримувати об'єктивну, репрезентативну та просторово деталізовану інформацію про екологічний стан об'єктів, що досліджуються. Такий підхід забезпечує не лише наукову точність, але й практичну доцільність при прийнятті управлінських рішень на локальному, регіональному й національному рівнях.

Оцінювання рекреаційних зон з урахуванням екологічних критеріїв сприяє збереженню біорізноманіття, запобігає надмірному навантаженню на екосистеми та створює передумови для гармонізації інтересів різних груп – місцевих громад, туристів, органів влади й природоохоронних організацій. У статті розглянуто сучасні методологічні підходи до оцінки екологічного стану рекреаційних територій, проаналізовано їх переваги, недоліки та практичну значущість у системі екологічного управління, з акцентом на інтеграцію наукових підходів та інструментів у реальні механізми природоохоронної політики.

Ключові слова: рекреаційна зона, екологічна оцінка, сталий розвиток, антропогенне навантаження.

Modern methodological approaches to assessing the environmental condition of recreational areas. Sakun A., Yermakov Yu.

In today's context of rapidly increasing recreational and anthropogenic pressure on natural areas, the implementation of effective approaches to assessing their environmental condition is becoming particularly relevant. The changes caused by urbanization, infrastructure development, and the growing intensity of tourism have a significant impact on ecosystems operating within recreational zones. Under such conditions, a well-founded assessment of these areas is not only a scientifically justified necessity but also a key element in maintaining ecological balance and promoting sustainable natural resource management. Systematic and comprehensive study of environmental parameters allows for the early detection of degradation processes, the prediction of potential risks, and the development of adaptive measures aimed at preserving natural landscapes.

Modern approaches to environmental monitoring include both traditional field research methods and advanced technologies such as remote sensing, the use of geographic information systems (GIS), bioindicators, and mathematical modeling. These tools make it possible to obtain objective, representative, and spatially detailed information about the environmental condition of the studied sites. This approach ensures not only scientific accuracy but also practical relevance in decision-making at the local, regional, and national levels.

Assessing recreational areas using environmental criteria contributes to the conservation of biodiversity, prevents excessive pressure on ecosystems, and lays the groundwork for harmonizing the interests of various stakeholders – local communities, tourists, authorities, and environmental organizations. This article examines modern methodological approaches to assessing the environmental condition of recreational territories, analyzing their advantages, limitations, and practical significance within the system of environmental governance, with a focus on integrating scientific tools and methods into real-world environmental policy mechanisms. *Key words:* recreational area, environmental assessment, sustainable development, anthropogenic pressure.

Постановка проблеми. В умовах інтенсивного розвитку туризму, зростання урбанізації та підвищення рекреаційного навантаження на природні території виникає необхідність у науково обґрунтованому підході до оцінки їх екологічного стану. Брак системності в моніторингу та відсутність єдиних методологічних підходів призводять до екологічного дисбалансу, деградації природних ресурсів і зниження рекреаційної цінності територій. Тому актуальним є пошук і впровадження сучасних, комплексних і адаптивних методів оцінки, які дозволять своєчасно реагувати на екологічні загрози, зберігати

природний потенціал зон відпочинку та забезпечувати сталий розвиток регіонів.

Актуальність дослідження. Сучасні тенденції використання природних територій під рекреаційні потреби супроводжуються зростанням антропогенного тиску, що спричиняє погіршення їх екологічного стану. Водночас, рекреаційні зони відіграють ключову роль у збереженні фізичного та психологічного здоров'я населення, забезпечуючи простір для відпочинку та відновлення. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки дієвих методологічних підходів до оцінки стану таких

територій, що дозволить не лише своєчасно виявляти екологічні проблеми, а й ефективно управляти природними ресурсами в контексті сталого розвитку. Це особливо важливо в умовах глобальних екологічних викликів та підвищеної уваги до збалансованого використання природного потенціалу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із вирішенням актуальних наукових і практичних завдань, спрямованих на вдосконалення підходів до оцінки екологічного стану природних територій, що зазнають рекреаційного навантаження. У межах дослідження здійснено узагальнення та аналіз сучасних методів екологічного моніторингу, адаптованих до специфіки рекреаційних зон, з урахуванням антропогенних факторів та інтенсивності впливу людської діяльності.

Наукове значення роботи полягає у систематизації методологічних підходів, які поєднують класичні методи польових спостережень із новітніми технологіями, такими як дистанційне зондування, геоінформаційні системи та біоіндикація. Запропоновано практичні рекомендації щодо їх ефективного використання у процесі екологічного управління територіями, що мають високу соціальну та природоохоронну цінність.

Практична значущість доробку полягає у можливості застосування отриманих результатів при розробці програм моніторингу, плануванні сталого рекреаційного використання територій, запобіганні деградації природних ландшафтів та збереженні біорізноманіття. Результати дослідження можуть бути корисними для органів місцевого самоврядування, природоохоронних установ, науковців та фахівців у сфері екологічного менеджменту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. [1] висвітлюють ключові аспекти правової безпеки у сфері земельних відносин в умовах реалізації принципів сталого розвитку. Дослідники акцентують увагу на важливості правових механізмів, які забезпечують раціональне використання та ефективне управління земельними ресурсами в межах рекреаційних територій, підкреслюючи необхідність досягнення балансу між розвитком і охороною довкілля.

У роботі [2] розглядаються підходи до формування стратегій інтегрованого розвитку туристичного сектору. Автори підкреслюють значення комплексного стратегічного планування, яке, з одного боку, сприяє економічному зростанню, а з іншого – забезпечує стійке функціонування туристичної інфраструктури як важливої складової сталого розвитку рекреаційних зон.

Автори [3] аналізують особливості державного регулювання системи раціонального природокористування в контексті розвитку біоекономіки, приділяючи особливу увагу екологічному складнику. Вони досліджують потенціал правових та політичних інструмен-

тів у забезпеченні сталого використання природних ресурсів, що є особливо актуальним для збереження екосистем у межах рекреаційних територій. Автори також оцінюють вплив чинної законодавчої бази на збереження біорізноманіття та екологічну безпеку.

У публікації [4] зосереджуються на оцінці регуляторної політики у країнах Східної Європи з позицій сталого розвитку. Їх дослідження вказує на потребу у створенні ефективних політичних засад, які б сприяли екологічно та економічно обґрунтованому перетворенню рекреаційних територій.

У публікації [5] розглянуто проблему незаконного будівництва на територіях природно-заповідного фонду. Дослідники демонструють негативні наслідки таких дій для природних екосистем і наголошують на необхідності посилення контролю та правового захисту цих територій.

У дослідженні [6] розкрито значення податкової політики як одного з ключових чинників забезпечення економічної безпеки держави. Автори підкреслюють важливість ефективного управління податковими надходженнями у контексті підтримки цілей сталого розвитку, включно з екологічними пріоритетами. Автори [7] досліджують взаємозалежність між рівнем екологічної поінформованості населення та ефективністю реалізації сталих політик, особливо в сільських громадах південно-східної частини Нігерії. Дослідження свідчить про те, що підвищення рівня екологічної свідомості є критично важливим для формування суспільної підтримки проєкологічних ініціатив і заходів сталого розвитку.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість досліджень, присвячених екологічному моніторингу та сталому розвитку рекреаційних територій, низка важливих аспектів досі залишається недостатньо вивченою або фрагментарно висвітленою. Зокрема, недостатньо уваги приділено інтегрованим методологічним підходам, що дозволяють комплексно оцінювати екологічний стан рекреаційних зон із врахуванням просторової неоднорідності, інтенсивності антропогенного навантаження та соціально-економічного контексту територій.

Новизна полягає в розробці комплексного методологічного підходу до оцінки екологічного стану рекреаційних зон, який враховує сучасні виклики сталого природокористування, просторову специфіку територій та ступінь антропогенного навантаження.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у вдосконаленні підходів до оцінки екологічного стану рекреаційних зон на основі поєднання класичних екологічних методів з сучасними технологічними інструментами, що забезпечує міждисциплінарний характер дослідження.

Виклад основного матеріалу. Екологічна оцінка стану рекреаційних зон є надзвичайно важливою у контексті збереження довкілля, сталого розвитку

та раціонального використання природних ресурсів. Регулярне оцінювання дозволяє своєчасно виявляти навіть незначні негативні зміни, спричинені антропогенним навантаженням, такими як витоппування, забруднення чи руйнування природного середовища. Це, у свою чергу, дає можливість вчасно впроваджувати превентивні заходи та мінімізувати негативні наслідки. Крім того, екологічно безпечне середовище сприяє забезпеченню якісного відпочинку для населення, створюючи умови для фізичного і психологічного оздоровлення. Оцінювання стану довкілля також є важливим інструментом для оцінки ефективності природоохоронних заходів, оскільки порівняння показників до і після їх впровадження дозволяє скоригувати управлінські стратегії.

Екологічний стан – це інтегральна характеристика якості навколишнього природного середовища, що визначається сукупністю фізико-хімічних, біологічних та соціально-економічних показників. У контексті рекреаційних зон екологічний стан відображає здатність екосистеми підтримувати природні функції при зростаючому антропогенному навантаженні.

Рекреаційні зони – це території, що використовуються населенням для відпочинку, оздоровлення, туризму та інших видів рекреаційної діяльності. Вони можуть включати лісопарки, національні природні парки, узбережжя водойм, гірські масиви, озеленені території міст тощо. Через інтенсивне використання ці ділянки є особливо чутливими до змін у навколишньому середовищі.

Актуальні екологічні дані слугують основою для ухвалення виважених рішень у сфері управління рекреаційними зонами. Це стосується як планування зонування територій, так і регулювання рівня рекреаційного навантаження, розробки ефективних природоохоронних заходів та формування відповідних фінансових і адміністративних стратегій. Водночас інформування громадськості про стан середовища формує екологічну свідомість, підвищує рівень відповідального ставлення до природи та стимулює громадську участь у збереженні довкілля. Рекреаційні території відіграють ключову роль у збереженні біорізноманіття та забезпеченні екосистемних послуг, таких як очищення повітря і води, регуляція мікроклімату та збереження ландшафтної структури. Надання екологічної інформації громаді сприяє конструктивному діалогу з владою та підтримці природоохоронних ініціатив.

Оцінка екологічного стану рекреаційних зон здійснюється за допомогою різних методологічних підходів, серед яких біоіндикаційні, фізико-хімічні, моделювальні, екосистемні та інтегровані. Біоіндикація базується на спостереженні змін у стані живих організмів – індикаторів. Їхня чисельність, видова структура та поведінка дають змогу визначити загальний стан екосистеми. Зокрема, лишайники свідчать про якість повітря, а дощові черв'яки – про стан ґрунтів. Перевагами є простота, доступність та можливість

оцінки довготривалих змін. Водночас, інтерпретація результатів вимагає глибоких знань і досвіду.

Фізико-хімічні методи передбачають використання спеціального обладнання та лабораторного аналізу для визначення фізичних і хімічних параметрів навколишнього середовища. Це включає вимірювання температури, pH, концентрації шкідливих речовин тощо. Такі методи забезпечують точні кількісні дані, однак є затратними й менш ефективними при оцінці довгострокових змін. Екологічне моделювання, у свою чергу, дозволяє прогнозувати зміни у стані екосистем під впливом різних чинників. За його допомогою можна передбачити наслідки рекреаційного навантаження, кліматичних коливань або техногенних впливів. Екосистемний підхід передбачає розгляд природного середовища як цілісної системи з усіма її компонентами і зв'язками, що дає змогу краще зрозуміти механізми самовідновлення екосистем і оцінити їхню стійкість до зовнішніх впливів. Інтегровані методи поєднують переваги зазначених підходів, забезпечуючи найбільш об'єктивну та комплексну оцінку.

Залежно від типу рекреаційної території застосовуються різні підходи. У природних парках доцільним є використання біоіндикації та екосистемного аналізу. У прибережних зонах важливу роль відіграє фізико-хімічний аналіз води, а в лісопаркових зонах – комплексний підхід із застосуванням усіх доступних методів. Порівняльний аналіз методів свідчить, що інтегровані підходи забезпечують найвищий рівень точності, комплексності та чутливості до змін. Їхня вартість є відносно високою, проте результати є найбільш надійними для прийняття стратегічних рішень.

Поєднання різних методів дозволяє компенсувати недоліки кожного з них та підвищити якість оцінки. Наприклад, фізико-хімічні дані дають точну кількісну інформацію, тоді як біоіндикація дозволяє виявити інтегральний екологічний ефект. Моделювання допомагає передбачити майбутні зміни, а екосистемний аналіз дозволяє оцінити функціональну цілісність середовища. Таким чином, синергія методів забезпечує максимально об'єктивну оцінку екологічного стану.

Сучасні технології відіграють ключову роль у вдосконаленні екологічного моніторингу. Геоінформаційні системи (ГІС) дозволяють здійснювати просторовий аналіз, створювати тематичні карти (табл. 1), інтегрувати великі масиви даних та аналізувати зміни у часовому аспекті. Супутникові знімки, дистанційне зондування та геостатистичні методи значно підвищують ефективність досліджень. Інтеграція ШІ відкриває нові можливості для автоматизованої обробки даних, виявлення аномалій, прогнозування змін та створення адаптивних систем управління. Однак впровадження ШІ супроводжується певними викликами, зокрема складністю інтерпретації результатів («чорна скринька»), етичними аспектами та потребою у фінансових інвестиціях.

Структура інформаційного забезпечення екологічного моніторингу регіону

Загальна екологічна характеристика регіону	Джерела негативної дії на довкілля	Зондування території	Система охоронних територій	Інженерно-технічні та транспортні комунікації	Охорона здоров'я та соціально побутові умови
–санітарно-епідеміологічні умови; – атмосферне повітря; – поверхневі та підземні води; – фізичний вплив; – зелені насадження.	– викиди; – скиди; – тверді відходи; – фізичне забруднення.	– об'єкти промислового значення; – селітебні території; – зелені насадження; – адміністративні будівлі; – об'єкти комунального призначення; – транспортні підприємства; – наукові організації; – пам'ятки архітектури.	– пам'ятки історії та культури; – водоохоронні зони; – охоронні зони інженерних комунікацій.	– водопроводи та каналізація; – теплотраси; – електромережа; – продуктопроводи; – телефонна мережа; – автомагістралі; – залізничні магістралі.	– комфортність інфраструктури; – захворюваність;

У перспективі інтеграція різноманітних методологічних підходів з технологіями ШІ та ГІС дозволить створити адаптивну, проактивну та високоточну систему оцінки екологічного стану рекреаційних зон. Така система сприятиме формуванню ефективної екологічної політики, забезпеченню збалансованого розвитку та збереженню унікальних природних комплексів.

Висновки. Оцінка екологічного стану рекреаційних зон є складним багатоаспектним процесом, що потребує використання сучасних, інтегрованих та адаптивних методологічних підходів. Рекреаційні території, як специфічний тип природокористування, потребують особливої уваги з боку дослідників і природоохоронних органів, оскільки вони одночасно виконують екологічні, соціальні та оздоровчі функції, перебуваючи при цьому під значним антропогенним тиском. Аналіз сучасних підходів засвідчив, що ефективна оцінка можлива лише за умови поєднання тра-

диційних методів – таких як біоіндикація та фізико-хімічний аналіз – з новітніми інструментами, зокрема геоінформаційними технологіями, дистанційним зондуванням Землі та соціоекологічними дослідженнями. Запропоновано шляхи вдосконалення системи оцінювання шляхом запровадження комплексного моніторингу, автоматизованого збору даних, розвитку цифрових екологічних сервісів, активного залучення громадськості та міждисциплінарного підходу до аналізу стану середовища. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації управління рекреаційними зонами, удосконалення практики екологічного планування та прийняття рішень щодо охорони й раціонального використання природних ресурсів у межах таких територій. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці адаптивних індикаторів, створенні інтерактивних карт екологічного стану та розширенні участі громадськості в процесах екологічного моніторингу.

Література

1. Legal security of land relations in the system of sustainable development / P. Pylypenko et al. *International Journal of Environmental Impacts*. 2023. Vol. 18. P. 1597–1604.
2. Kozak Y., Derkach T., Huz D. Forming the strategy of integrated development of tourism enterprises. *Baltic Journal of Economic Studies*. 2019. Vol. 5. C. 105–115.
3. Legal security of land relations in the system of sustainable development / P. Pylypenko et al. *International Journal of Environmental Impacts*. 2023. Vol. 18. P. 1597–1604.
4. Analysis of regulatory policy in the context of sustainable development of eastern European countries. / Y. Safonov et al. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2022. Vol. 17. P. 2189–2197.
5. Šostak O. R., Kutut V. Investigation into expansion of illegal construction in the National Park of Curonian Spit. *Business: Theory and Practice*. 2009. Vol. 10. P. 223–232.
6. Regulatory policy of tax revenues efficiency assurance as the dominant of state economic security / A. Abramova et al. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2022. Vol. 17. P. 1727–1736.
7. Environmental Knowledge and Policy Sustainability: A Study of Pro Environmental Policy Support among the Southeast Nigerian Rural Communities / O. Samuel et al. *International Journal of Sustainable Development and Planning*. 2022. Vol. 17. P. 341–350.

Дата першого надходження рукопису до видання: 15.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ОСОБЛИВОСТІ ВИКЛАДАННЯ ОСНОВ ГРАНТРАЙТИНГУ ЗДОБУВАЧАМ ЕКОЛОГІЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ

Тихомирова Т.С., Босюк А.С., Шестопалов О.В., Новожилова Т.Б., Філенко О.М.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків
tetiana.tykhomyrova@khpi.edu.ua

У роботі досліджено особливості викладання освітньої компоненти, яка містить основи грантрайтингу та управління екологічними проектами для здобувачів екологічних спеціальностей у закладі вищої освіти. Викладання основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей є важливим елементом формування нової генерації науковців, які вміють шукати джерела фінансування та реалізовувати проекти у відповідності до концепції сталого розвитку. Проаналізовані фактори, які впливають на необхідність запровадження викладання освітнього компоненту, який містить основи грантрайтингу. Наявність відповідних компетенцій у стандартах вищої освіти спеціальностей E2 (101) «Екологія» та G2 (183) «Технології захисту навколишнього середовища» та активізації пропозицій грантової підтримки в Україні на тлі військової агресії визначені як основні фактори.

У роботі проаналізовані переваги комплексного підходу до вивчення освітньої компоненти, яка містить основи грантрайтингу для студентів екологічних спеціальностей, який полягає у закріпленні на практичних заняттях теоретичного матеріалу через розв'язання практичних кейсів завдань, які стосуються проектів в сфері екології, природоохоронних технологій тощо. Надані рекомендації щодо введення даного освітнього компоненту в залежності від наявних рівнів екологічної вищої освіти у закладі.

Наведені сім особливостей, які автори даного дослідження виділяють при викладанні освітньої компоненти, яка містить основи грантрайтингу для студентів екологічних спеціальностей. Визначено, що необхідно приділяти значну увагу для здобувачів екологічних спеціальностей на наступні теми: автоматизації пошук відповідності грантового проекту цілям та завданням сталого розвитку; набуття навичок виділення індикаторів успішності екологічного проекту; SWOT аналізу проекту; побудові команди та лідерству; вмінню розрізняти та виділяти стейкхолдерів, бенефіціарів та цільову аудиторію проекту. *Ключові слова:* грантрайтинг; управління проектами; SWOT-аналіз; освіта задля сталого розвитку; грантова заявка.

Features of teaching grantwriting basics to students in environmental specialties. Tykhomyrova T., Bosiuk A., Shestopalov O., Novozhylova T., Filenko O.

The teaching specifics for the educational component that includes the grantwriting and environmental project management basics for students of environmental specialties at a higher education institution are given in this paper. Teaching the grantwriting basics to students of environmental specialties is an important element in the scientists' new generation formation who are able to find funding sources and implement projects according to the sustainable development concept. The factors that influence the need to introduce teaching an educational component that includes the grantwriting basics are analyzed. The presence of relevant competencies in the higher education standards for specialty E2 (101) "Ecology" and G2 (183) "Environmental Protection Technologies" and the grant support proposals in Ukraine activation against the backdrop of military aggression are identified as the main factors.

The paper analyzes the advantages of a comprehensive approach to studying the educational component, which includes the grantwriting basics for students of environmental specialties, which consists of consolidating theoretical material in practical classes through solving practical case studies of tasks related to projects in the ecology area, environmental technologies, etc. Recommendations are provided for this educational component introduction depending on the existing levels of environmental higher education at the university.

Seven features are given that the authors of this study highlight when teaching the educational component, which contains the grant writing basics for students of environmental specialties. It was determined that it is necessary to pay significant attention to the following topics for environmental specialties students: automating the search for grant project compliance with the sustainable development goals and targets; acquiring skills in identifying indicators of the success for environmental project; SWOT analysis of the project; team building and leadership; the ability to distinguish and identify stakeholders, beneficiaries and the target audience of the project. *Key words:* grantwriting, project management, SWOT analysis, education for sustainable development, grant application.

Постановка проблеми. Пошук джерел фінансування для втілення у життя проектів, ідей, розробок є важливим елементом розвитку науково-технічного потенціалу країни. Особливо гостро стоїть проблема пошуку фінансування для молоді, оскільки вони не мають наукового ступеню, достатньої кількості наукових публікації та досвіду для участі у державних програмах фінансування наукових розробок. Все це зумовлює підвищений інтерес здобувачів всіх рівнів освіти до стартап проектів та грантових конкурсів, завдяки яким можна отримати

фінансування. Успіх в отриманні фінансування за грантовим чи стартап конкурсом залежить від багатьох факторів, серед яких вміння заповнювати заявки, розуміння основ управління проектами, вправність презентації проекту є важливими. Також вирішальну роль відіграють чіткість формулювання мети, актуальність проблематики, науково-технічна новизна запропонованого рішення та обґрунтованість бюджету, що демонструє готовність команди ефективно реалізувати проект у межах визначених ресурсів і термінів.

Актуальність дослідження. На даний момент багато уваги приділяється управлінню проектами, створенні стартап та грантових проєктів в ІТ сфері та в сфері публічного адміністрування. Існуючі посібники для широкого кола зацікавлених осіб з написання грантових проєктів у простій та доступній формі тлумачать основи грантрайтингу, не фокусуючись на особливостях заповнення грантових заявок, життєвого циклу грантового проєкту саме в сфері природоохоронних технологій, сталого розвитку та сталого туризму, збереження заповідного фонду тощо. Викладання основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей є важливим елементом формування нової генерації науковців, які вміють шукати джерела фінансування та реалізовувати проєкти у відповідності до концепції сталого розвитку.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема дослідження пов'язана з національними завданнями сталого розвитку 4.5 «Збільшити поширеність серед населення знань і навичок, необхідних для отримання гідної роботи та підприємницької діяльності», 8.6 «Створити інституційні та фінансові можливості для самореалізації потенціалу економічно активної частини населення та розвитку креативної економіки», 9.7 «Забезпечити збільшення участі молоді у наукових дослідженнях» які закріплені у Національній доповіді «Цілі сталого розвитку: Україна», а також з глобальними завданнями сталого розвитку, 4.7 «До 2030 року забезпечити, щоб усі учні здобували знання і навички, необхідні для сприяння сталому розвитку, у т. ч. шляхом навчання з питань сталого розвитку та сталого способу життя, прав людини, гендерної рівності, пропаганди культури миру та ненасильства, громадянства світу й усвідомлення цінності культурного різноманіття і вкладу культури в сталий розвиток» [1, с. 34; 1, с. 63; 1, с. 71; 1, с. 153].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Необхідність диференційованого підходу до викладання схожих дисциплін в залежності від спеціалізації здобувачів доведена авторами у [2, с. 105]. На прикладі викладання основ екологічної безпеки та енергозбереження студентам-медикам доведено доцільність запровадження сучасних технологій навчання з одночасним наголосом на акцентованому навчанні, яке базується на охопленні тільки найнеобхіднішої, для здобувачів даної спеціальності, інформації [2, с. 106].

Стратегії залучення фінансування через фандрайзинг та грантрайтинг з ідентифікацією найпоширеніших помилок наведені у [3, с. 261]; у [4, с. 37; 5, с.] досліджено потенціал грантрайтингу для відновлення України у воєнний та післявоєнний час, особлива увага приділена необхідності пришвидшення процесу виділення знань спеціалістів із фандрайзингу та грантрайтингу в окрему професійну категорію як запоруку інтенсивного використання

можливостей фандрайзингу та грантрайтингу та проаналізовано основні загрози ефективного використання спроможностей партнерів-донорів.

Авторами [6, с. 48] проаналізовано перспективи залучення грантових грошей для реалізації проєктів в сфері охорони навколишнього природного середовища, протидії та пом'якшення наслідків зміни клімату, підвищення енергоефективності через Програму дій щодо навколишнього середовища та клімату Європейської комісії «LIFE».

Відселенню грантрайтингу та грантознавства в окрему галузь знань, яка має свої методології, інструменти та принципи й здатна позитивно впливати на розвиток країни присвячене дослідження [7, с. 64]

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наявні дослідження в сфері стратегії написання грантів та реалізації грантових проєктів охоплюють загальні питання даної теми, не фокусуючись на освітній складовій навчання спеціалістів різних галузей, особливо майбутніх фахівців в сфері екології та природоохоронних технологій. Окремі дослідження зазначають необхідність освітньої складової для поширення серед молоді використання інструментів грантрайтингу з метою пошуку альтернативних джерел фінансування своїх проєктів, ідей та розробок.

Новизна. У роботі вперше ідентифіковані та охарактеризовані особливості викладання основ грантрайтингу здобувачам різних рівнів екологічних спеціальностей.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення роботи полягає у формуванні переліку особливостей викладання основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей, ідентифікації тем та розділів, які потребують особливої уваги для формування у здобувачів повного комплексу компетентностей в галузі грантрайтингу. Результати дослідження можуть бути використані викладачами закладів фахової передвищої та вищої освіти.

Викладання основного матеріалу. Доцільність виділення грантрайтингу в окремий освітній компонент (ОК) або окремий модуль для здобувачів екологічних спеціальностей в межах існуючих освітніх компонентів зумовлений трьома головними чинниками:

- 1) поступовий перехід світової економіки до проєктної та розвиток ринку фінансування проєктів за рахунок коштів спільноти або донорів;
- 2) активізації міжнародної допомоги на тлі військових дій в Україні у формі надання грантів на різноманітні цілі;
- 3) наявність відповідних компетенцій у стандартах вищої освіти спеціальностей Е2 (101) «Екологія» та G2 (183) «Технології захисту навколишнього середовища».

Серед компетенцій, які необхідно сформувати у здобувачів всіх рівнів освіти спеціальностей Е2 та

G2, та які формуються при опануванні основ грантрайтингу, автори виділяють наступні:

1) на першому (бакалаврському) рівні – K09 Здатність працювати в команді та K25 Здатність до опанування міжнародного та вітчизняного досвіду вирішення регіональних та транскордонних екологічних проблем (спеціальність E2) та K06 Здатність розробляти та управляти проєктами (спеціальність G2) [8, с. 5; 9, с. 6]

2) на другому (магістерському) рівні – здатність генерувати нові ідеї (креативність) та здатність розробляти та управляти проєктами, які присутні в стандартах обох спеціальностей E2 та G2 [10, с. 6; 11, с. 6]

3) на третьому рівні (аспірантура) – здатність працювати у міжнародному контексті та здатність ініціювати, розробляти і реалізовувати комплексні інноваційні проєкти у сфері екології та дотичні до неї міждисциплінарні проєкти, лідерство під час їх реалізації, які присутні в стандартах обох спеціальностей E2 та G2 [12, с. 8; 13, с. 8].

В межах автономії вищих навчальних закладів введення основ грантрайтингу може відбуватися на будь-якому рівні освіти чи навіть на кожному з них, приймаючи до уваги заборону на дублювання змісту ОК на кожному наступному рівні освіти.

Досвід викладання основ грантрайтингу авторам даного дослідження дозволяє рекомендувати наступну схему введення ОК, який містить основи грантрайтингу:

1) за наявності всіх трьох послідовних рівнів освіти – вводити на другому рівні освіти окремим освітнім компонентом;

2) за відсутності другого та третього рівня освіти – вводити як окремий змістовний модуль до освітніх компонентів, пов'язаних з управлінням проєктами;

3) на третьому освітньому рівні дана дисципліна може бути вибірковою для тих здобувачів, які не мають попередньої фахової екологічної освіти або здобували вищу освіту понад 10 років назад.

Автори даного дослідження виділяють головну особливість при викладанні основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей – не ефективним є просте пояснення основ заповнення форми для подачі заявки та опанування навичок пошуку донорів. Необхідно реалізовувати комплексний підхід та розглядати основи грантрайтингу в контексті управління грантовим проєктом в сфері екології впродовж всіх етапів його життєвого циклу. В межах такого підходу лекційний матеріал закріплюється на конкретних практичних прикладах під час практичних занять, а також під час виконання індивідуального завдання (рис. 1).

Останнім часом все більше інженерних проєктів, які отримують як грантову та старт-ап підтримку, містять так звану «екологічну» складову. До складу проєктних команд часто запрошують фахівців-еколо-

гів, які мають базове розуміння екологічної складової проєкту та можуть її успішно аргументувати та презентувати. Все частіше форми заявок містять пряму вимогу, що стосується відповідності проєкту цілям та завданням сталого розвитку. Під час презентації проєктів наявність інформації про таку відповідність підвищує цінність проєкту в очах журі/донорів.

Автори даного дослідження рекомендують започаткувати викладання ОК основ сталого розвитку як передумову ОК основи грантрайтингу для автоматизації у студентів навички співвідношення цілей та завдань сталого розвитку (національний та глобальний рівень) з проєктом, ідеєю, розробкою.

Аналіз грантових конкурсів в сфері захисту навколишнього природного середовища, енергоефективності, природоохоронних технологій, проведений авторами, свідчить про необхідність заповнення форм подачі заявки (Application form) англійською мовою у 72% випадків, українською та англійською мовами –15% випадків, тільки українською мовою –13%.

Особливість № 1 при викладанні ОК, яка містить основи грантрайтингу: викладання цього ОК на другому рівні освіти англійською мовою. При викладанні на першому освітньому рівні рекомендується вводити 1-2 практичних занять з основами англійської лексики в сфері грантрайтингу та правил побудови речень з закріпленням отриманих знань через переклад.

На другому рівні освіти викладання даного ОК англійською мовою також сприяє набуттю магістрами загальної компетенції спілкування іноземною мовою в професійному середовищі [10, с. 6].

Особливість № 2 : необхідність формування у здобувачів чіткого розуміння класифікації проєктів за їх переважною належністю до старт-ап чи грантових проєктів. Межа між старт-ап та грантовим проєктом тонка та розмита, у загальному вигляді до старт-ап проєктів відносять проєкти, при реалізації яких є можливість отримати прибуток від продажу товару чи послуг.

Віднесення проєкту до якогось типу часто залежить від змісту проєкту та вимог конкурсу; у здобувачів екологічних спеціальностей виникають складнощі у розумінні, до якого типу проєктів з точки зору перспективних джерел фінансування відноситься їх проєкт.

Авторами була розроблена та апробована класифікація проєктів, яка полегшує здобувачам розуміння даного питання (табл. 1). Під час практичних занять рекомендується спробувати класифікувати проєкти здобувачами.

Особливість № 3: при викладанні основ грантрайтингу необхідно приділяти увагу здобувачів на формування команди проєкту, функцій лідера команди.

Команди грантових проєктів в сфері екології дуже часто мають свої особливості, серед яких слід відмітити для здобувачів наступні [14, с. 13]:

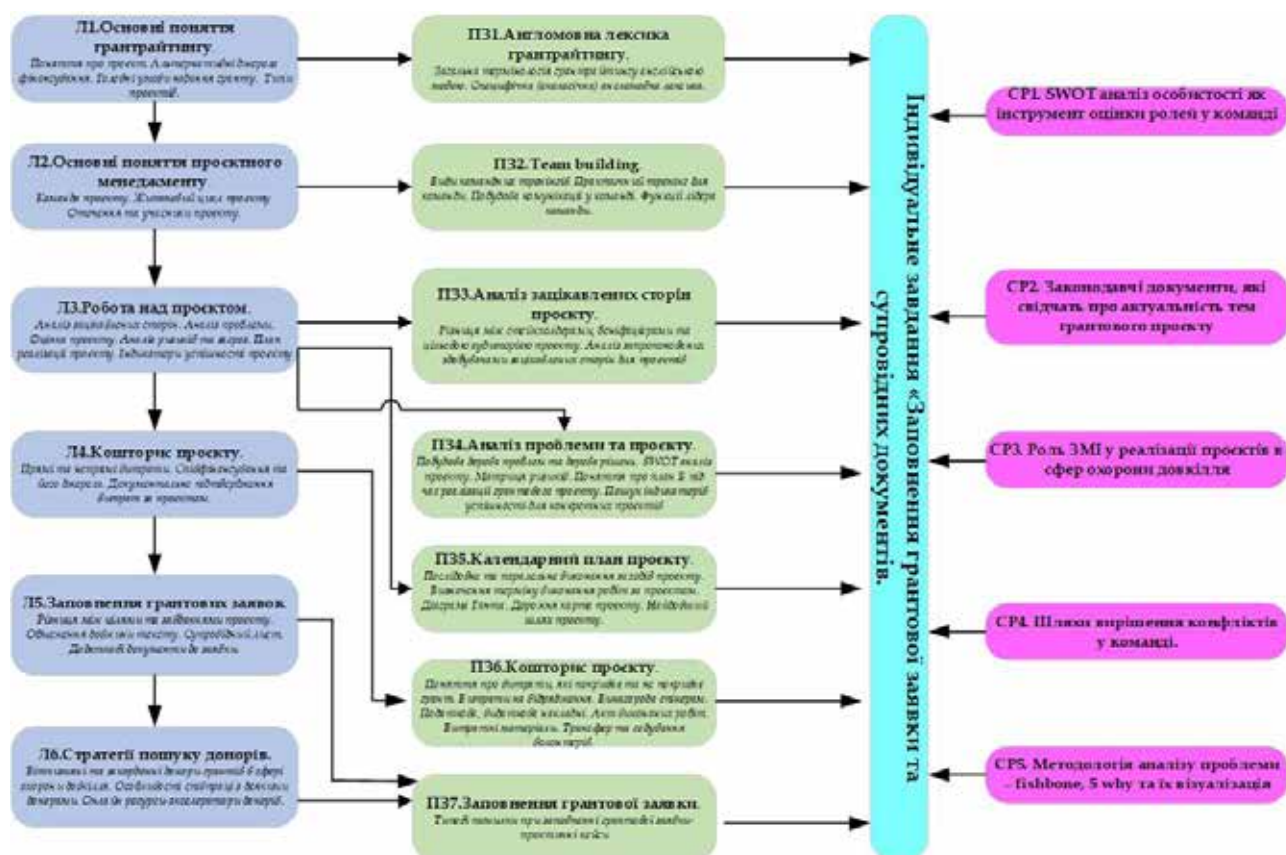


Рис. 1. Приклад логічної схеми освітнього компоненту з основ грантрайтингу для здобувачів екологічних спеціальностей

Л – лекційні заняття; ПЗ – практичні заняття; СР – самостійна робота

1) командою екологічного гранту часто стають не працівники однієї компанії, а різні за фахом, місцем роботи, вподобаннями, соціальним статусом та освітою люди. Особливо це стосується так званих «маленьких» та/або локальних грантів. Їх об'єднує, як правило, тільки спільна мета – покращити стан довкілля. Відповідно, часто виникають конфліктні ситуації, які необхідно вміти передбачати та вирішувати;

2) наявність формального лідера – людини, яка зібрала навколо себе знайомих та малознайомих людей. В процесі роботи над грантовою заявкою та наступною реалізацією формальний лідер часто не виправдовує покладених на нього сподівань та виникає потреба у призначенні нового, неформального лідера;

3) у середніх та регіональних екологічних грантах дуже часто зустрічається команда, яка складається з декількох невеликих команд на чолі з лідером – декілька громадських об'єднань, екологічних фондів та інших об'єднань громадян намагаються отримати один грант у сфері екології. У таких випадках члени маленьких команд, як правило, добре комунікують в середині своїх команд, тоді як загальна комунікація потребує додаткових зусиль.

Основи team building можуть бути включені до переліку практичних занять та навіть реалізовані під

час проведення практичних занять, особливо у групах здобувачів другого та третього рівня, де здобувачі, як правило, мало знайомі між собою.

Особливість № 4: при викладанні основ грантрайтингу є необхідність пояснення студентам різниці між метою та результатами проєкту, стейкхолдерами, беніфіціарами та цільовою аудиторією. Ці поняття є частиною ОК управління проєктами, проте здобувачі екологічних спеціальностей, як правило, не мають ґрунтовної підготовки з цих питань. Найскладнішим для здобувачів виявляється виділення безпосередньо беніфіціарів проєкту.

Особливість № 5: необхідність проведення SWOT аналізу проєкту, що викликає певні складнощі у здобувачів екологічних спеціальностей. SWOT аналіз проєктів є важливим інструментом оцінки зовнішніх та внутрішніх загроз та ризиків проєкту; є необхідним в якості внутрішнього документу для всебічного аналізу проєкту та часто вимагається в якості додаткової інформації в грантових конкурсах. Розповсюдженою помилкою при складанні SWOT аналізу серед здобувачів екологічних спеціальностей є віднесення наявності конкурентів або аналогічних реалізованих проєктів або проєктів, які знаходяться на стадії реалізації, до загроз або ризиків. Якщо стартап проєкт – це завжди щось нове та унікальне, то грантовий проєкт часто має аналоги,

Таблиця 1

Класифікація екологічних проєктів з точки зору перспективних джерел фінансування

Короткий опис проєкту	Класифікація проєкту	
	старт-ап	грант
Новий прилад для моніторингу параметрів навколишнього природного середовища, в тому числі портативний та для експрес-аналізу	+	-
Інформаційна база з елементами ГІС для громадського моніторингу стану та параметрів навколишнього природного середовища	-	+
Освітні проєкти в сфері екології, в тому числі щодо формування екологічної культури та екологічної свідомості	-	+
Інформаційні проєкти, в тому числі розробка дизайну інформаційних плакатів, стратегій інформаційних компаній в соціальних мережах	-	+
Проєкти, присвячені сталому управлінню твердими побутовими відходами у громадах:		
– запровадження сортування відходів	-	+
– відкриття нового бізнесу у сфері поводження з відходами	+	-
Проєкти по розвитку органічного землеробства	+	-
Соціально-екологічні проєкти, які спираються на використання вторинної сировини, але мають виражену соціальну складову	-	+
Випуск нової продукції, технологія виготовлення якої або сама продукція відповідає концепції сталого розвитку та може бути сертифіковано як «екологічна»	+	-
Проєкти в сфері зеленої енергетики:		
– підвищення енергоефективності виробництва чи комунально-житлових приміщень	-	+
– створення енергетичних кооперативів з метою отримання прибутку від зелених енергетичних тарифів	+	-
– розробка та випуск нового енергоефективного екологічно нейтрального матеріалу	+	-

особливо в екологічній сфері. Наявність конкурентів є позитивним чинником, адже вивчаючи історію конкурентів ви можете, перш за все, не допустити їх помилок, по-друге – нема потреби витрачати час на знайомство споживача з вашими ідеями в цілому, за вас це зробили конкуренти.

Особливість № 6: пошук індикаторів успішності проєкту. Стандартні індикатори не є релевантними при реалізації екологічних проєктів, особливо освітньо-екологічних та соціально-екологічних. Кількість відвідувачів тренінгу чи вебінару не свідчать про позитивний вплив на громаду та зміну типу мислення. Наприклад, для оцінки успішності проєкту з сортування твердого побутового сміття в громаді навіть кількість домогосподарств, які почали сортувати сміття після освітнього проєкту не є релевантним індикатором успішності та впливу проєкту. Релевантним індикатором буде сума заощаджених на вивозі сміття коштів, сума отриманих за здачу вторсировини коштів, кількість нових підприємств, які приймають вторсировину у громаді та проводять далі операції з нею, кількість установ комунальної сфери, які започаткували сортування сміття тощо. Доцільно зі здобувачами на практичних заняттях розбирати індикатори для загальних типів екологічних проєктів (табл. 1).

Особливість № 7: відсутність у здобувачів екологічних спеціальностей ґрунтовних компетентностей в сфері складання кошторису, знань типів бухгалтер-

ських документів, які підтверджують витрати за проєктом та відповідають чинному податковому законодавству України; відсутність понять про систему оподаткування доходів тощо. Відповідно, викладачу необхідно приділити цим питанням значний час. У здобувачів третього рівня освіти, як правило, загальні знання про вищеперелічені питання глибші.

Авторами було успішно апробовано наступний підхід до практичних занять: на початку семестру разом зі здобувачами розробляли або знаходили опис реалізованих грантових проєктів, які стосуються екологічних питань, природоохоронних технологій, захисту та відновленню довкілля та складали їх короткий опис [15, с. 39]. Далі під час практичних занять виконували завдання на конкретних проєктах зі складеного переліку. Такий підхід дозволяє по-перше, максимально залучити здобувачів, по-друге зосередити увагу на екологічних проєктах та їх особливостях. Якщо деякі проєкти з року в рік схожі, то викладач має змогу розбирати помилки та підкреслювати позитивні моменти, які були у попередньому році вивчення у кожній наступній групі. Усі проєкти також можуть бути використані в якості прикладів під час лекційних занять у наступні роки.

В якості індивідуального завдання з ОК, який містить основи грантрайтингу, автори рекомендують заповнення реальної грантової заявки здобувачами з обов'язковим наданням SWOT аналізу проєкту та публічною дискусією у групі щодо окремих

елементів заявки, таких як цілі проєкту, індикатори успішності, цільова аудиторія, стейкохолдери, бенефіціари.

Головні висновки. Освітній компонент, який містить основи грантрайтингу, є важливим для формування нової генерації молоді, які вміють шукати альтернативні джерела фінансування для своїх проєктів та успішно втілювати їх у життя. Для здобувачів екологічних спеціальностей, в тому числі E2 та G2, важливим є формування компетентностей в галузі грантрайтингу для екологічних проєктів, увага до яких зростає з року в рік. Відсутність ґрунтовної підготовки в сфері управління проєктами різного рівня та складності може знизити відсоток успішної реалізації грантових проєктів в сфері екології навіть за умови отримання позитивного рішення донорів. Комплексний підхід до викладання основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей може

бути реалізований з врахуванням особливостей, які наведені у роботі та які витікають з особливостей підготовки фахівців в сфері екології та охорони довкілля. Найважливішою особливістю викладання основ грантрайтингу здобувачам екологічних спеціальностей є необхідність ретельного опрацювання питань, пов'язаних з управлінням проєктами – таких як SWOT аналіз проєкту, кошторис проєкту, команда проєкту та комунікація у команді. Також необхідно приділяти увагу методикам відокремлення між собою стейкхолдерів, бенефіціарів та цільової аудиторії проєкту.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати даного дослідження можуть бути використані викладачами закладів фахової передвищої та вищої освіти при розробці власних освітніх компонентів, які містять основи грантрайтингу, для здобувачів екологічних та інших спеціальностей.

Література

1. Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» / Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (дата звернення: 10.12.2024).
2. Масікевич А.Ю., Лебедев В.В., Горбунов К.О., Моїсєєв В.Ф. Сучасні та інноваційні технології навчання студентів медичних спеціальностей в області безпекових дисциплін та енергозбереження. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2024. № 4. С. 104-110.
3. Nahaichuk V.V. Fundraising and grantwriting: funding strategies. *Herald of khmelnytskyi national university. Economic sciences*. 2023. № 332(4). Р. 260-263.
4. Кобеля-Звір М.Я. Фандрейзинг, грантрайтинг як особливий інструмент відновлення України у воєнний та післявоєнний час. *Приазовський економічний вісник*. 2023. № 3 (35). С. 34-39.
5. Коровий Я.В., Веслова Я.В. Грантрайтинг під час військового стану: ризики в умовах нестабільності. 2024. *Економічний простір*. № 195. С. 113-116.
6. Кобеля-Звір М.Я., Звір Ю.В. Гранти програми дій щодо навколишнього середовища та клімату європейської комісії «LIFE». *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління*. 2023. Т.34(73). № 3. С. 47-51.
7. Кобеля-Звір М.Я. Грантознавство як галузь знань про гранти. *Сталій розвиток економіки*. 2024. № 3(50). С. 62-68.
8. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти : затв. наказом МОН від 04.10.2018 р. № 1076. Вид. офіц. Київ : Мін-во освіти і науки України, 2018. 15 с.
9. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» галузі знань 18 «Виробництво та технології» для першого (бакалаврського) рівня вищої освіти : затв. наказом МОН від 13.11.2018 р. № 1241. Вид. офіц. Київ : Мін-во освіти і науки України, 2018. 13 с.
10. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки» для другого (магістерського) рівня вищої освіти : затв. наказом МОН від 04.10.2018 р. № 1066. Вид. офіц. Київ : Мін-во освіти і науки України, 2018. 15 с.
11. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» галузі знань 18 «Виробництво та технології» для другого (магістерського) рівня вищої освіти : затв. наказом МОН від 04.03.2020р. № 378. Вид. офіц. Київ : Мін-во освіти і науки України, 2020. 16 с.
12. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 101 «Екологія» галузі знань 10 «Природничі науки» для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, затв. наказом МОН від 23.12.2021 р. № 1421. Вид. офіц. Київ : Мін-во освіти і науки України, 2021. 15 с.
13. Стандарт вищої освіти за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища» галузі знань 18 «Виробництво та технології» для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, затв. наказом МОН від 23.12.2021 р. № 1427. Вид. офіц. Київ : Мін-во освіти і науки України, 2021. 16 с.
14. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Управління екопроєктами та міжнародне співробітництво у сфері охорони довкілля»: для здобувачів усіх рівнів вищої освіти та форм навчання / уклад. Т. С. Тихомирова, О. М. Філенко, А. О. Литвин. Харків : НТУ «ХПІ», 2025. 76 с.
15. Methodological guidance for a practical classes from the course «International cooperation and grantwriting in ecology»: for students specialty 101 «Ecology», 183 «Environmental protection technologies» all forms of education, including foreign students / comp.: T. S. Tykhomyrova, O. V. Shestopalov, O. S. Makhonina. Kharkiv : NTU «KhPI», 2023. 63 p.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

СУЧАСНИЙ СТАН ЗЕМЕЛЬНИХ РЕСУРСІВ РАВА-РУСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

Войтків П.С., Іванов Є.А., Шмалій Ю.Ю.

Львівський національний університет імені Івана Франка

вул. Університетська 1, 79000, м. Львів

petro.voytkiv@lnu.edu.ua, yevhen.ivanov@lnu.edu.ua, yulian.shmalii@lnu.edu.ua

Вивчено структуру земельного фонду Рава-Руської територіальної громади за категоріями земельних угідь. Здійснено екологічне оцінювання земельних ресурсів громади, зокрема розраховано та проаналізовано екологічну стабільність територій, рівень антропогенного навантаження на землі, а також екологічний стан агроландшафтів по кожному адміністративному утворенню. Об'єктом дослідження є земельні ресурси Рава-Руської територіальної громади, а предметом – стан цих ресурсів. Метою дослідження є аналіз сучасного стану земельного фонду та екологічне оцінювання земельних ресурсів.

Встановлено, що у структурі земельних угідь найбільша частка земель припадають сільськогосподарські землі площі – 62,45 %, ліси та інші лісовкриті займають – 29,10 %, забудовані землі – 4,46 %, водно-болотні ресурси – 2,76 %, відкриті землі без рослинного покриву – 1,38 %. В межах громади переважають екологічно середньо стабільні території. Водночас присутні екологічно слабо стабільні території. Рівень антропогенного навантаження на земельні ресурси визначаємо як середній, а екологічний стан агроландшафтів – незадовільний.

Для територій громади, що зазнають значного антропогенного навантаження на земельні ресурси, пропонуємо розробити оптимізаційну модель землекористування, що передбачає скорочення сільськогосподарських земель, особливо ріллі, та доведення частки природних угідь до оптимального показника. Результати досліджень доцільно використовувати для покращення екологічної стабільності земель, зменшити рівень антропогенне навантаження на земельні ресурси, а також змінити екологічний стан агроландшафтів в адміністративних утвореннях з найгіршими показниками. *Ключові слова:* земельні ресурси, земельний фонд, екологічне оцінювання, екологічна стабільність, рівень антропогенного навантаження, стан агроландшафтів.

The current state of land resources of the Rava-Ruska territorial community of Lviv region. Voitkiv P., Ivanov Ye., Shmalii Yu.

For the first time, the structure of the land fund of the Rava-Ruska territorial community was studied by categories of land. An ecological assessment of the community's land resources was carried out, i.e., the ecological stability of the territories, the level of anthropogenic pressure on the land, and the ecological condition of agricultural landscapes for each administrative unit were calculated and analyzed. The object of the study is the land resources of the Rava-Ruska territorial community. The subject is the current state of land resources and their environmental assessment. The purpose of the study is to determine the current state of the land fund and environmental assessment of land resources.

As a result, it was found that the largest share of land in the structure of land is agricultural land (62.45%), forests and other forested areas (29.10%), built-up land (4.46%), wetlands (2.76 %), and open land without vegetation cover (1.38%). Based on the results of the calculations, it was determined that ecologically medium stable areas prevail within the community under study. The community's lands belong to ecologically weakly stable areas. The level of anthropogenic pressure on land resources is characterized as medium. The ecological condition of agricultural landscapes is unsatisfactory.

For the territories of the community that experience the greatest anthropogenic pressure on land resources, it is proposed to develop an optimization model of land use that involves reducing agricultural land, especially arable land, and bringing the share of natural lands to the optimal level. The results of the research should be used to improve the environmental stability of land, reduce the level of anthropogenic pressure on land resources and change the ecological state of agricultural landscapes in the administrative units with the worst indicators. *Key words:* land resources, land fund, environmental assessment, environmental sustainability, level of anthropogenic load, state of agricultural landscapes.

Постановка проблеми. Незбалансоване і неконтрольоване використання земельних ресурсів, підвищення рівня антропогенного навантаження на довкілля спричиняють значні зміни його компонентів, які впливають на соціально-демографічні процеси, функціонування економіки і підприємництва, а також створює напругу екологічної ситуації. Сукупність таких проблем спричиняють погіршення екологічного стану, зокрема забруднення і порушення земель внаслідок екстенсивного використання і розвиток несприятливих природних процесів.

Земельні угіддя є важливим природним ресурсом, від правильності використання якої залежить добробут населення, а сама родючість землі відображається на виробництві продуктів харчування. В свою чергу, таке виробництво буде залежати від площі земель, що використовуються в господарстві та їх продуктивності. Нині ця проблема практично не вирішена, вимоги виробництва випереджають наукові розробки, а саме використання земельних ресурсів є невиправданим, необдуманим і незбалансованим. При цьому виникає потреба глибшого

вивчення сучасного стану земельних ресурсів, здійснення оцінювання їх екологічного стану, а також вивчення та аналіз всіх проблем, які пов'язані із антропогенним навантаженням і використанням цих ресурсів в межах Рава-Руської територіальної громади.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика дослідження відповідає темі науково-дослідної роботи кафедри конструктивної географії і картографії Львівського національного університету імені Івана Франка: «Проблеми трансформації природно-антропогенних геосистем західного регіону України в контексті Євроінтеграції» (№ держреєстрації: 0123U102092). Результати дослідження можуть бути використані громадою для оптимізації землекористування й вдосконалення управління земельними ресурсами.

Новизна. Вперше вивчено структуру земельного фонду та здійснено екологічне оцінювання земельних ресурсів «новоствореної» Шептицької громади, тобто розраховано та проаналізовано екологічну стабільність територій, рівень антропогенного навантаження на землі, а також екологічний стан агроландшафтів по кожному адміністративному утворенню. Зроблений належний аналіз та запропоновано заходи щодо покращення екологічного стану цих земель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед основних засобів запобігання погіршення екологічного стану земельних ресурсів слід вважати їхній постійний моніторинг та оцінювання на різних рівнях, постійно оновлювати інформацію про структуру земельних ресурсів та використання землевласниками і користувачами та надавати вільний доступ до неї. Цим питанням присвячено увагу в окремих роботах, які стосувалися громад колишнього Жовківського району [1–4 та ін.]. Однак вивченню сучасного стану земельних ресурсів Рава-Руської громади не приділено належної уваги.

Об'єктом дослідження є земельні ресурси Рава-Руської територіальної громади. **Предметом** є аналіз стану використання земельних ресурсів в межах громади. **Метою** дослідження є сучасний стан використання земель на території Рава-Руської громади. Для досягнення поставленої мети основними завданнями є: оцінити природні умови формування громади; дослідити стан використання та екологічний стан земельних ресурсів громади.

Методика дослідження. Оцінка антропогенного впливу на земельні ресурси території громади проведено шляхом аналізу структури земельного фонду (співвідношення площ земель, які зайняті сільськогосподарськими угіддями, лісами, водою та забудовою) [11]. Для екологічного оцінювання стану земельних ресурсів громади застосовано цікаву методику визначення коефіцієнтів екологічної стабільності території, рівня антропогенного тиску та ступеня порушення рівноваги у агроланд-

шафтах, запропоновану Н. Рідесом і Д. Шофоловим [9]. В основу аналізу покладено розрахунок коефіцієнтів, які описують величину впливу господарської діяльності. У першому випадку враховують частку різних типів угідь, у другому – бальне оцінювання ступеня їхнього антропогенного навантаження.

Виклад основного матеріалу. Рава-Руська територіальна громада створена 12 червня 2020 р. під час адміністративно-територіальної реформи з адміністративним центром – місто Рава-Руська [10].

Громада має вигідне положення щодо важливих транспортних шляхів, які обумовили розгалужену та розвинуту інфраструктуру. Громада межує з Белзькою, Великомошівською, Добросинсько-Магерівською та Яворівською територіальними громадами і Польщею (рис. 1).

Згідно з фізико-географічним районуванням, в межах Бузького Малого Полісся громада відноситься до району Ратинського (на північ від Рава-Руської) і Желдецького Полісся (на схід від цього ж міста). Водночас в межах фізико-географічної області Розточчя, що також простягається територією громади, знаходиться район Равського Розточчя, що невеликими ділянками представлений на півдні та заході громади [6]. За іншим фізико-географічним районуванням України, досліджувана громада розташована в межах Малого Полісся і Розточчя. Більша її частина включена до Європейської рівнинної ландшафтно-ї країни, зони широколистяних лісів, Західноукраїнського краю, де виокремлено дві області: Мале Полісся і Волинська височина [5].

Екологічний стан земельних ресурсів у громаді зумовлюється впливом промислових підприємств, впливом об'єктів інфраструктури поселень та методами ведення сільського і лісового господарства.

Загальна площа громади становить 31 959,3 га, з них на площі сільськогосподарських угідь припадає 19 957,4 га (62,4 %) [8]. В тому числі на ріллі припадає 13 410,8 га (42 %), землі лісового фонду – 9 299,9 га (29,1 %), забудовані землі – 1 426,2 га (4,4 %), землі під водою – 621 га (1,9 %), землі природоохоронного та історико-культурного призначення – 165,86 га (0,5 %).

Загалом, землі сільськогосподарського призначення займають більшу частину території, що дає змогу громаді, у комплексі із збалансованим використанням, потужний сільськогосподарський потенціал.

Орні землі сільськогосподарських угідь належать до земель середньої якості. За останні десятиліття, в результаті скорочення поголів'я худоби та занепаду багатьох сільськогосподарських підприємств і внесення органічних добрив в ґрунти, скоротилося, що призводить до зменшення родючості. Іншою проблемою, що призводить до виснаження ґрунтів є переважання посівних площ під культури, що із урожаєм виносять значні обсяги поживних речовин (ріпак, соняшник, кукурудза) [10].

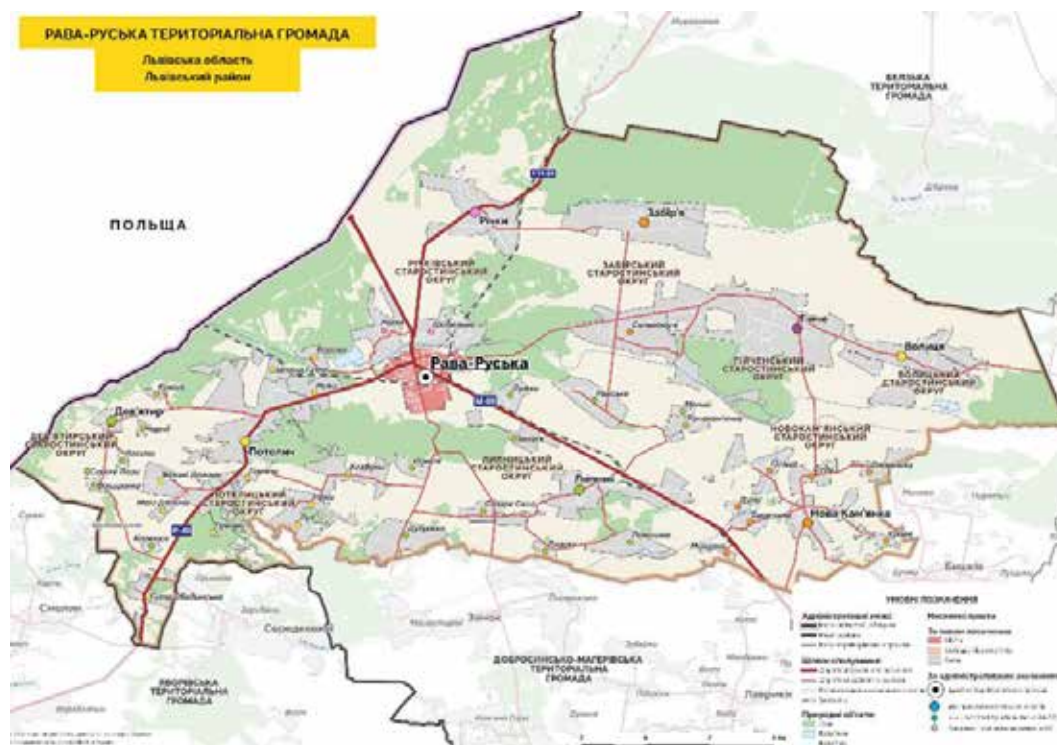


Рис. 1. Географічне розташування Рава-Руської громади [7]

Результати дослідження показали, що структура земельного фонду громади є строкатою і потребує детальнішого вивчення та аналізу. Зокрема, найбільші площі займають сільськогосподарські землі, які зменшились на 98,93 га (0,31 %). Площа лісів є також досить значною і по громаді зросли на 12,00 га (0,06 %). Стосовно забудованих земель, то їх площа в громаді є досить великою, головню завдяки м. Рава-Руська, і збільшилася за останні роки на 136,52 га (0,42 %). Водно-болотні ресурси займають незначні і незмінні площі. Землі без рослинного покриву займають ще менші площі.

Структура земельного фонду по адміністративних утвореннях громади представлена у таблиці 1. На основі отриманих даних бачимо, що площі територіальних утворень не змінилися. Найбільшою є територія Річківського (5 883,70 га), Липницького (5 363,00 га) і Потелицького (5 324,90 га) округів. Найменшими є площі, що зайняті Рава-Руською міською радою (1 014,00 га) і Дев'ятирським (1 556,80 га) округом.

У структурі земель громади переважають землі сільськогосподарського призначення. Найбільші площі є на територіях Липницького (4213,80 га) округу, що знаходиться у південній частині громади. Менші площі спостерігаємо в межах Річківського (2 690,54 га), Потелицького (2 643,83 га) і Новокам'янського (2 632,37 га) округів. Таке зменшення головню пов'язане з тим, що значні площі переведено під забудовані землі. Дещо збільшилися площі сільськогосподарських угідь

в межах Гійчеського округу (2 329,92 га). Найменші площі цих земель маємо на території Рава-Руської (217,24 га) міської ради.

Лісів та інших лісовкритих площ у громаді є найбільше в межах Потелицького (2 273,15 га) і Річківського (2857,56 га) округів. Власне ці два округи знаходяться в західній частині громади. Менше заліснених площ є на територіях Гійчеського і Забірського округів. Вони знаходяться в північній частині громади.

На території громади маємо значні площі забудованих земель. Найбільше їх у межах Рава-Руської (441,05 га) міської ради, а також Потелицького (253,00 га), Річківського (202,94 га) і Липницького (192,46 га) округів. В цілому площі забудованих земель в громаді суттєво збільшилися із 1 289,67 га (4,04 %) до 1 426,19 га (4,46 %).

Дещо менші площі у порівнянні із забудованими землями займають водно-болотні землі. Зокрема, найбільше їх на територіях Потелицького (136,20 га), Гійчеського (122,00 га) округів і Рава-Руської (171,65 га) міської ради. Найменші площі під водно-болотними землями спостерігаємо в межах Дев'ятирського (14,50 га) округу.

Найбільші площі відкритих земель без рослинного покриву зустрічаються в межах Рава-Руської міської ради (132,06 га) та Річківського (74,06 га), Новокам'янського (56,36 га) і Липницького (67,05 га) округів.

Серед інших земель є землі природоохоронного призначення, які присутні тільки в межах Потелицького округу, що знаходиться на заході гро-

Таблиця 1

Загальна структура земельного фонду Рава-Руської громади, га / % [12]

Адміністративне утворення	Роки	Загальна площа земель, у т.ч.:	сільсько-господарські землі	ліси та інші лісовкриті площі	забудовані землі	водно-болотні землі	відкриті землі без рослинного покриву
Рава-Руська громади	2008	31959,30	20056,29	9287,85	1289,67	880,95	444,54
		100	62,76	29,06	4,04	2,76	1,38
	2022	31959,30	19957,38	9299,85	1426,17	880,95	394,95
		100	62,45	29,10	4,46	2,76	1,24
Волицький старостинський округ	2008	2787,10	2247,48	369,50	55,82	102,10	12,20
		100	80,64	13,26	2,00	3,66	0,44
	2022	2787,10	2245,98	369,50	57,23	102,10	12,29
		100	80,59	13,26	2,05	3,66	0,44
Гійчеський старостинський округ	2008	3955,00	2327,33	1444,00	53,67	122,00	8,00
		100	58,85	36,51	1,36	3,08	0,20
	2022	3955,00	2329,92	1441,18	53,90	122,00	8,00
		100	58,91	36,44	1,36	3,09	0,20
Дев'ятирський старостинський округ	2008	1556,80	1092,92	381,80	66,28	14,50	1,30
		100	70,20	24,53	4,26	0,93	0,08
	2022	1556,80	1092,34	382,38	66,28	14,50	1,30
		100	70,17	24,56	4,26	0,93	0,08
Забірський старостинський округ	2008	3133,10	1922,92	1051,80	44,58	87,70	26,10
		100	61,37	33,57	1,42	2,80	0,83
	2022	3133,10	1916,67	1051,80	50,83	87,70	26,10
		100	61,18	33,57	1,62	2,80	0,83
Липницький старостинський округ	2008	5363,00	4213,80	825,00	166,11	90,00	68,09
		100	78,57	15,38	3,10	1,68	1,27
	2022	5363,00	4188,49	825,00	192,46	90,00	67,05
		100	78,10	15,38	3,59	1,68	1,25
Новокам'янський старостинський округ	2008	2941,70	2643,42	47,80	100,98	98,20	51,30
		100	89,86	1,63	3,43	3,34	1,74
	2022	2941,70	2632,37	47,28	107,49	98,20	56,36
		100	89,49	1,61	3,65	3,34	1,92
Потелицький старостинський округ	2008	5324,90	2646,33	2273,15	251,49	136,20	17,73
		100	49,70	42,69	4,72	2,56	0,33
	2022	5324,90	2643,83	2273,15	253,99	136,20	17,73
		100	49,65	42,69	4,77	2,56	0,33
Річківський старостинський округ	2008	5883,70	2728,30	2842,80	163,32	58,60	90,68
		100	46,37	48,32	2,78	0,99	1,54
	2022	5883,70	2690,54	2857,56	202,94	58,60	74,06
		100	45,73	48,57	3,45	0,99	1,26
Рава-Руська міська рада	2008	1014,00	233,79	52,00	387,42	171,65	169,14
		100	23,06	5,13	38,21	16,93	16,67
	2022	1014,00	217,24	52,00	441,05	171,65	132,06
		100	21,42	5,13	43,50	16,93	13,03

мади. Площі цих земель збільшилися із 165,86 га до 207,17 га.

Аналіз структури земельного фонду території Рава-Руської громади показав, що переважають сіль-

ськогосподарські землі – 62,45 % і лісові угіддя – 29,10 %, значно менше забудованих земель – 4,46 %, водно-болотних земель – 2,76 % і відкритих земель без рослинного покриву – 1,24 %.

Проблема збалансованого використання земельних ресурсів громад за їх визначеним використанням є актуальною. Зміни напрямків використання, які є необдуманими та незбалансованими, призводять до порушення рівноваги екологічного стану всіх категорій земельних угідь. Тому оцінювання екологічного стану земельних ресурсів за їх категоріями використання потребує детального вивчення та аналізу.

Сучасні екосистеми території Рава-Руської громади є комплексом як природних, так і антропогенних компонентів, співвідношення яких вказує на стабільність або нестабільність її екологічного стану. Нами використано методику визначення екологічної стабільності території і рівня антропогенного навантаження (за Н. Рідесом і Д. Шофоловим), що враховує кількісні та якісні характеристики компонентів довкілля, а саме земельні ресурси [9].

За результатами проведених розрахунків визначено, що усі земельні угіддя колишнього Жовківського району відносяться до екологічно слабо стабільних територій (0,46 у. б.), а в громаді землі також відносяться до слабо стабільних територій (0,44 у. б.). У громаді екологічно нестабільними є території Новокам'янського (0,31 у. б.) округу і Рава-Руської (0,30 у. б.) міської ради (рис. 4). До слабо стабільних територій, відносять території Волицького (0,44 у. б.), Дев'ятирського (0,43 у. б.) і Липницького (0,40 у. б.) округів. До середньо стабільних територій належать Гійчеської (0,51 у. б.), Забірського (0,51 у. б.), Потелицького (0,51 у. б.) і Річківського (0,55 у. б.) округів.

Коефіцієнт *Кан* характеризує величину впливу господарської діяльності, тобто це бальна оцінка ступеня антропогенного навантаження. Коефіцієнт, що вказують на рівень антропогенного наванта-

ження в межах колишнього Жовківського району становить 2,97 у. б. і є середнім. На території Рава-Руської громади він є також середнім (3,04 у. б.). Підвищений коефіцієнт антропогенного навантаження спостерігаємо в межах Волицького (3,20 у. б.), Дев'ятирського (3,10 у. б.), Липницького (3,26 у. б.) і Новокам'янського (3,11 у. б.) округів. Середній рівень антропогенного навантаження виявлено на територіях Гійчеського (2,77 у. б.), Забірського (2,81 у. б.), Потелицького (2,67 у. б.) і Річківського (2,59 у. б.) округів. Високий (найгірший) рівень антропогенного навантаження спостерігаємо в межах Рава-Руської (4,11 у. б.) міської ради (рис. 5).

Важливим при оцінюванні екологічного стану земель є визначення ступеня порушення рівноваги у агроландшафтах. Як в колишньому Жовківському районі, так і в Рава-Руській громаді стан агроландшафтів є незадовільним. Стан агроландшафтів з критичним показником мають такі адміністративно-територіальні одиниці громади: Гійчеський, Дев'ятирський, Липницький і Потелицький округи, а також Рава-Руська міська рада (рис. 6). Незадовільний показник спостерігаємо в межах Волицького, Забірського, Новокам'янського і Річківського округів.

Висновки. Земельні ресурси Рава-Руської громади мають важливу соціальну та економічну роль і виступають чинником привабливості даного регіону щодо майбутніх інвестицій в їх розвиток з боку України та країн ЄС.

Встановлено, що в структурі земельних фондів найбільша частка земель припадає на сільськогосподарські землі – 62,45 %, менше на ліси та інші лісовкриті площі – 29,10 %, ще менше на забудовані землі – 4,46 %, водно-болотні ресурси – 2,76 %, відкриті землі без рослинного покриття – 1,38 %.

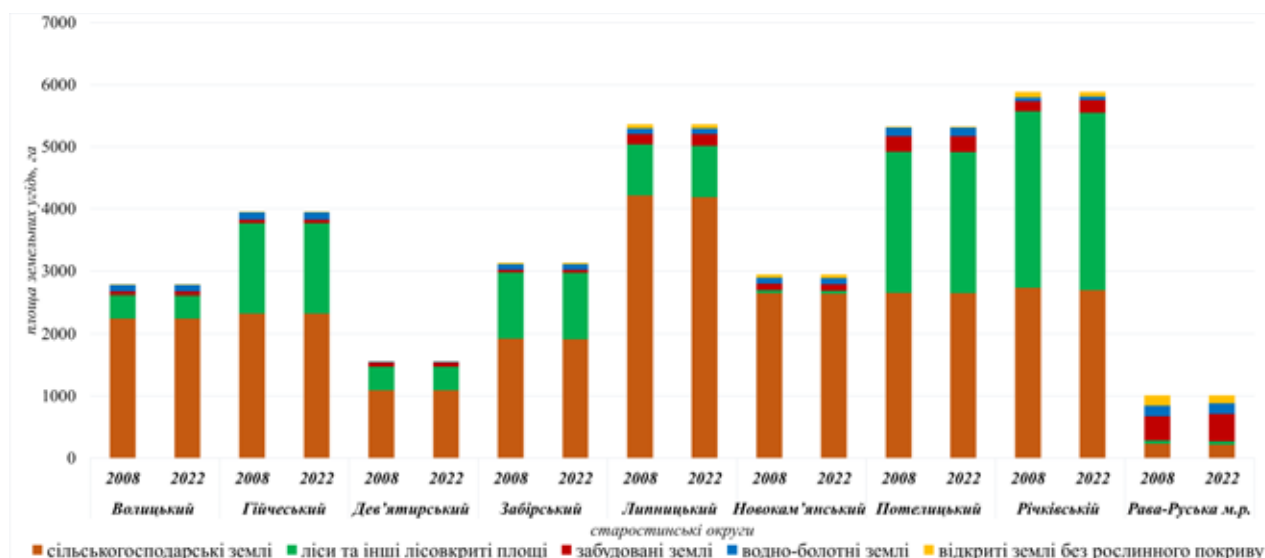


Рис. 2. Розподіл земельних угідь в адміністративних одиницях Рава-Руської громади

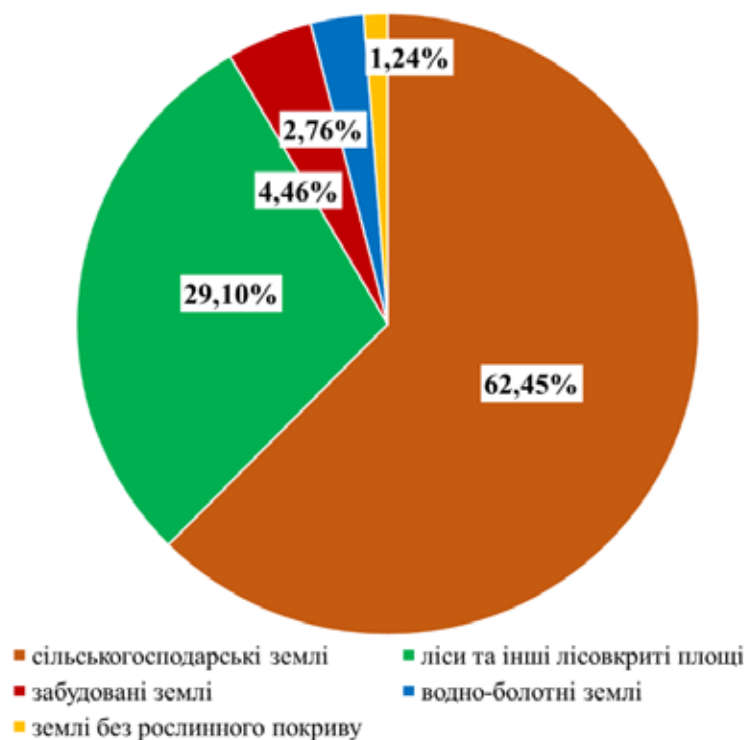


Рис. 3. Структура земельних ресурсів в межах Рава-Руської громади

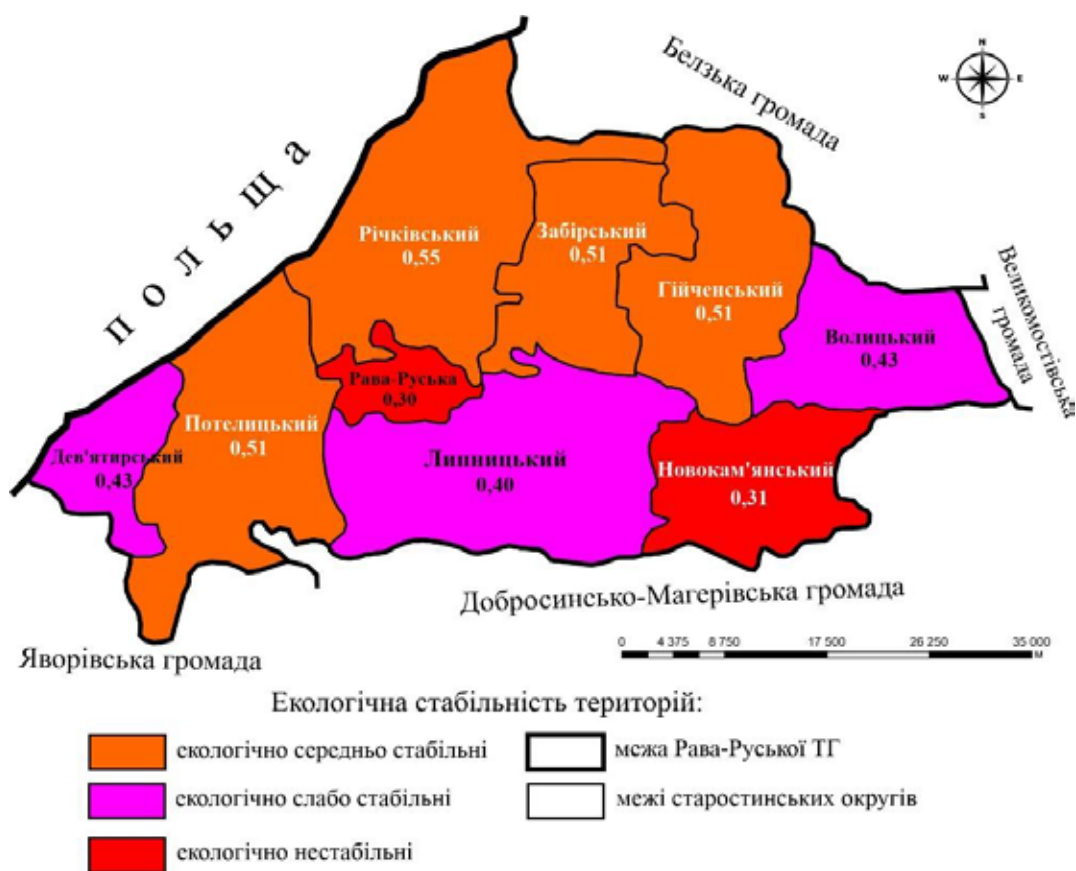


Рис. 4. Екологічна стабільність земель Рава-Руської громади



Рис. 5. Рівень антропогенного навантаження на земельні ресурси Рава-Руської громади



Рис. 6. Екологічний стан агроландшафтів Рава-Руської громади

За результатами проведених розрахунків визначено, що в межах громади переважають екологічно середньо стабільні території. Рівень антропогенного навантаження на земельні ресурси характеризується як середній, а екологічний стан агроландшафтів – незадовільний.

Для територій громади, які зазнають найбільшого антропогенного навантаження на земельні ресурси, пропонуємо розробити оптимізаційну модель земле-

користування, що передбачає скорочення сільсько-господарських земель, особливо ріллі, та доведення частки природних угідь до оптимального показника. Результати досліджень можна використовувати для покращення екологічної стабільності земель, зменшення рівня антропогенного навантаження на земельні ресурси та зміну екологічного стану агроландшафтів в адміністративних утвореннях громади з найгіршими показниками.

Література

1. Войтків П., Іванов Є., Войтович М. Оцінювання екологічного стану земельних ресурсів Куликівської територіальної громади Львівського району Львівської області. *Наукові горизонти XXI століття : мультидисциплінарні дослідження* : матер. міжнарод. наук. конф. Ужгород; Київ, 2024. С. 184–189.
2. Войтків П. С., Іванов Є. А. Екологічне оцінювання стану земельних ресурсів Червоноградського району Львівської області. *Екологічні науки*. 2024. № 1 (52). Т. 1. С. 173–178. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.27>.
3. Войтків П. С., Іванов Є. А., Телегуз О. Г. Оцінювання ступеня порушення рівноваги в агроландшафтах Червоноградського району Львівської області. *Scientific Collection «InterConf+»*, 28 (137): with the Proceedings of the 7th International Scientific and Practical Conference «Theory and Practice of Science: Key Aspects» (December 19-20, 2022; Rome, Italy), 2022. P. 206–215. <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.12.2022.021>.
4. Войтків П., Іванов Є., Шкірка І. Екологічне оцінювання стану земельних ресурсів Добросиньсько-Магерівської територіальної громади Львівського району Львівської області. *Суспільно-географічні чинники розвитку регіонів* : матер. VIII-ої міжнарод. наук.-практ. інтернет-конф. Луцьк : ФОП Мажула Ю. М., 2024. С. 47–49.
5. Гаськевич В. Г., Позняк С. П. Осушені мінеральні ґрунти Малого Полісся. Львів : ВЦ ЛНУ ім. І. Франка, 2004. 256 с.
6. Геоecологія Львівської області : монографія / за заг. ред. Є. Іванова. Львів : Простір-М, 2021. 606 с.
7. Карта Рава-Руської територіальної громади. *Львівська районна рада* : офіц. вебпортал. <https://lvivskaraya-rada.gov.ua/lvivskyy-rayon/terytorialni-hromady>.
8. Профіль Рава-Руської міської територіальної громади. Матеріали до Стратегії розвитку Рава-Руської міської територіальної громади до 2027 р. https://rada.info/upload/users_files/04056256/b78a37919fbb58d489a45a0ef903aba2.pdf.
9. Рідей Н. М., Шофолов Д. Л. Екологічна стандартизація для забезпечення сталого землекористування та охорони земель. *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. 2009. Вип. 1 (12). С. 41–50.
10. Стратегія розвитку Рава-Руської міської територіальної громади до 2027 р. https://rada.info/upload/users_files/04056256/aed0503219cf5517dcfac8b1be743bd3.pdf.
11. Фоновий моніторинг навколишнього природного середовища: монографія / за ред. М. М. Приходька. Івано-Франківськ : Фоліант, 2010. 324 с.
12. Фондові матеріали Головного управління Держгеокадастру у Львівській області по земельних ресурсах. Львів, 2008–2022.

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

УДК 349.6 (477)

ПРИРОДООХОРОННЕ ЗАКОНОДАВСТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОГЕННИХ ЗАГРОЗ У СФЕРІ РАДІОЕКОЛОГІЇ

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

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини
вул. Садова, 2, 20300, м. Умань

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

Роль природоохоронного законодавства як ключового інструменту регулювання техногенних загроз у сфері радіоекології. Актуальність теми зумовлена зростанням радіоекологічних ризиків внаслідок інтенсивної експлуатації ядерних об'єктів, зберігання радіоактивних відходів та наслідків надзвичайних ситуацій, пов'язаних із техногенними катастрофами. Автори аналізують нормативно-правову базу України та міжнародні правові акти, спрямовані на забезпечення екологічної та радіаційної безпеки. Особливу увагу приділено функціям природоохоронного законодавства у системі управління ризиками, правовим механізмам превенції та відповідальності за порушення у сфері радіоекології.

Розглянуто проблему неузгодженості між секторальними правовими актами, що регулюють радіаційний захист, природоохоронну діяльність та техногенну безпеку. Обґрунтовано необхідність інтеграції екологічного права з нормами техногенної та радіаційної безпеки на засадах сталого розвитку. Зроблено висновок про важливість удосконалення законодавства з урахуванням екосистемного підходу, наукових даних у сфері радіоекології та принципів екологічної справедливості.

Додатково проаналізовано роль державних екологічних інспекцій у забезпеченні дотримання норм природоохоронного законодавства в контексті радіоекологічного нагляду. Запропоновано конкретні рекомендації щодо підвищення ефективності законодавчого регулювання, зокрема впровадження обов'язкової екологічної експертизи радіаційно небезпечних об'єктів, цифровізацію моніторингу та посилення міжнародного співробітництва. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації правових стратегій у сфері національної екологічної політики, а також у підготовці спеціалістів з екологічного права, екологічної безпеки та радіоекології. *Ключові слова:* природоохоронне законодавство, радіоекологія, техногенні загрози, екологічна безпека, правове регулювання, радіаційний ризик, екологічне право, сталий розвиток, нормативно-правова база, екологічна політика.

Environmental legislation as a tool for regulating technological hazards in the field of radioecology Parakhnenko V., Goncharuk V.

The role of environmental legislation as a key instrument for regulating man-made threats in the field of radioecology. The relevance of the topic is due to the growth of radioecological risks as a result of the intensive operation of nuclear facilities, the storage of radioactive waste and the consequences of emergencies associated with man-made disasters. The author analyses the regulatory framework of Ukraine and international legal acts aimed at ensuring environmental and radiation safety. Particular attention is paid to the functions of environmental legislation in the risk management system, legal mechanisms for prevention and liability for violations in the field of radioecology.

The problem of inconsistency between sectoral legal acts regulating radiation protection, environmental protection activities and man-made safety is considered. The need to integrate environmental law with man-made and radiation safety standards on the basis of sustainable development is justified. The conclusion is made about the importance of improving legislation, taking into account the ecosystem approach, scientific data in the field of radioecology and the principles of environmental justice.

In addition, the role of state environmental inspections in ensuring compliance with environmental legislation in the context of radioecological supervision is analysed. Specific recommendations are proposed to improve the effectiveness of legislative regulation, in particular the introduction of mandatory environmental assessment of radiation-hazardous facilities, digitisation of monitoring and strengthening of international cooperation. The results of the study can be used to optimise legal strategies in the field of national environmental policy, as well as in the training of specialists in environmental law, environmental safety and radioecology. *Key words:* environmental legislation, radioecology, man-made threats, environmental safety, legal regulation, radiation risk, environmental law, sustainable development, regulatory framework, environmental policy.

Постановка проблеми. Сучасна екологічна ситуація в Україні та світі засвідчує зростання ризиків, пов'язаних із техногенними загрозами, зокрема у сфері радіоекології. Наслідки аварій на ядерних об'єктах, поводження з радіоактивними відходами, а також збереження та моніторинг забруднених

територій вимагають чіткої правової регламентації та ефективного державного контролю. Попри наявність природоохоронного законодавства, виникають труднощі із його практичним застосуванням, недостатньою адаптацією до новітніх екологічних викликів, а також з координацією між різними гіл-

ками влади та структурами, відповідальними за радіаційну безпеку. Залишається актуальним питання ефективності правового механізму у запобіганні, мінімізації та ліквідації наслідків техногенного впливу на довкілля в умовах воєнного та поствоєнного періодів. Тому необхідно дослідити можливості вдосконалення природоохоронного законодавства як ключового інструменту державної політики у сфері радіоекологічної безпеки [1].

Актуальність дослідження. У контексті глобального зростання техногенних ризиків, зокрема пов'язаних із ядерною енергетикою, воєнними конфліктами та збереженням забруднених територій, питання ефективності природоохоронного законодавства у сфері радіоекології набуває особливого значення. Україна, маючи гіркий досвід Чорнобильської катастрофи та нові виклики, пов'язані з загрозами на ядерних об'єктах під час бойових дій, потребує модернізації та посилення правових механізмів захисту довкілля від радіаційного забруднення. Наявна законодавча база часто виявляється недостатньо гнучкою, узгодженою та адаптованою до сучасних умов, що ускладнює реагування на надзвичайні ситуації. Саме тому дослідження ролі, ефективності та напрямів вдосконалення природоохоронного законодавства є вкрай актуальним для забезпечення екологічної безпеки, захисту здоров'я населення та сталого розвитку в умовах постійної загрози техногенних аварій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок безпосередньо пов'язаний із вирішенням актуальних наукових і практичних завдань, що стосуються підвищення ефективності регулювання техногенних загроз у сфері радіоекології. У статті здійснено комплексний аналіз природоохоронного законодавства в контексті забезпечення екологічної безпеки та радіаційного захисту населення, що є важливим як для теоретичного осмислення, так і для розробки прикладних рішень. Запропоновані підходи та висновки можуть бути використані при вдосконаленні нормативно-правової бази, формуванні національних екологічних стратегій, а також у практиці державного екологічного контролю й оцінки ризиків. Робота також сприяє розвитку міждисциплінарних досліджень на стику права, екології та безпеки, що відповідає сучасним вимогам наукової спільноти та запитам суспільства в умовах зростання техногенних викликів [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років проблема регулювання техногенних загроз у сфері радіоекології стала предметом активного вивчення вітчизняними та зарубіжними науковцями. Значна увага приділяється питанням правового забезпечення екологічної безпеки, зокрема в працях таких дослідників, як Ю. Шемшученко, Н. Маляренко, О. Кухаренко, які аналізують ефективність природоохоронного зако-

нодавства та механізмів його реалізації. У наукових публікаціях Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) та вітчизняного Інституту радіоекології розглядаються технічні аспекти впливу іонізуючого випромінювання на довкілля, а також принципи екологічного моніторингу забруднених територій. Актуальність дослідження також підкреслюється зростаючим інтересом до аналізу радіаційних ризиків у контексті воєнних дій, що простежується в аналітичних оглядах екологічних організацій та матеріалах міжнародних конференцій. Водночас, залишається потреба у комплексному дослідженні взаємозв'язку між природоохоронною нормативною базою та реальною ефективністю реагування на техногенні загрози, що й визначає наукову новизну та практичну цінність авторського підходу [3].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри значну кількість наукових досліджень, присвячених загальним аспектам природоохоронного законодавства та проблемам радіаційної безпеки, низка важливих питань залишається недостатньо розробленою. Зокрема, потребує глибшого аналізу ефективність наявних правових механізмів реагування на техногенні радіоекологічні загрози в умовах зростаючих ризиків, зумовлених не лише технологічними аваріями, а й воєнними діями. Недостатньо висвітлено питання узгодженості міжгалузевого законодавства, адаптації екологічних норм до надзвичайних ситуацій, а також ролі місцевих органів влади та громадськості у забезпеченні радіоекологічної безпеки. Крім того, залишаються не вирішеними аспекти впровадження сучасних цифрових технологій (ГІС, моніторингових систем, big data) у правове регулювання екологічного контролю. Саме цим аспектам – правовим прогалинам, організаційно-управлінським викликам та потенціалу інновацій – і присвячується дана стаття.

Новизна: наше дослідження полягає у комплексному аналізі природоохоронного законодавства саме крізь призму його здатності ефективно регулювати техногенні загрози у сфері радіоекології, з урахуванням сучасних викликів, зокрема ризиків, пов'язаних із військовими діями поблизу ядерних об'єктів. Уперше зроблено акцент на потребі адаптації правових механізмів екологічної безпеки до умов надзвичайного та воєнного стану, а також обґрунтовано необхідність інтеграції новітніх цифрових технологій моніторингу в практику державного екологічного контролю. Запропоновано авторське бачення удосконалення міжвідомчої координації та участі громадськості в системі запобігання радіоекологічним загрозам. Робота поєднує правовий, екологічний та управлінський підходи, що забезпечує її міждисциплінарний характер і розширює можливості практичного застосування отриманих результатів [4].

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження має важливе методологічне та загаль-

нонаукове значення, оскільки поєднує правовий, екологічний та управлінський підходи до аналізу механізмів регулювання техногенних загроз у сфері радіоекології. Запропонована аналітична модель оцінки ефективності природоохоронного законодавства в умовах зростаючих радіаційних ризиків може бути використана як основа для подальших наукових розвідок у галузі екологічного права, безпеки та державного управління. Робота також формує методологічну базу для розробки стратегічних рішень, нормативно-правових актів та механізмів взаємодії між державними структурами, науковими установами та громадськістю. Завдяки міждисциплінарному підходу дослідження сприяє розвитку сучасної наукової парадигми, орієнтованої на запобігання екологічним катастрофам, зокрема в радіоактивно забруднених регіонах або регіонах з потенційними ядерними ризиками.

Виклад основного матеріалу. У сучасних умовах техногенного навантаження на навколишнє середовище, особливо в контексті радіоекологічних загроз, природоохоронне законодавство виступає ключовим інструментом регулювання та мінімізації ризиків для здоров'я населення і стану екосистем.

Радіоекологічна безпека забезпечується завдяки встановленню правових норм, що регламентують поведінку з джерелами іонізуючого випромінювання, порядок здійснення екологічного контролю, обмеження забруднення довкілля радіонуклідами, а також шляхом застосування адміністративної та кримінальної відповідальності за порушення вимог екологічної безпеки [5].

Графік 1 демонструє зміну середнього рівня радіаційного фону у Київській, Житомирській та Харківській областях за період 2015–2023 рр. Спостерігається тенденція до зниження показників, що свідчить про ефективність екологічних та право-

вих заходів з обмеження техногенного впливу [6].

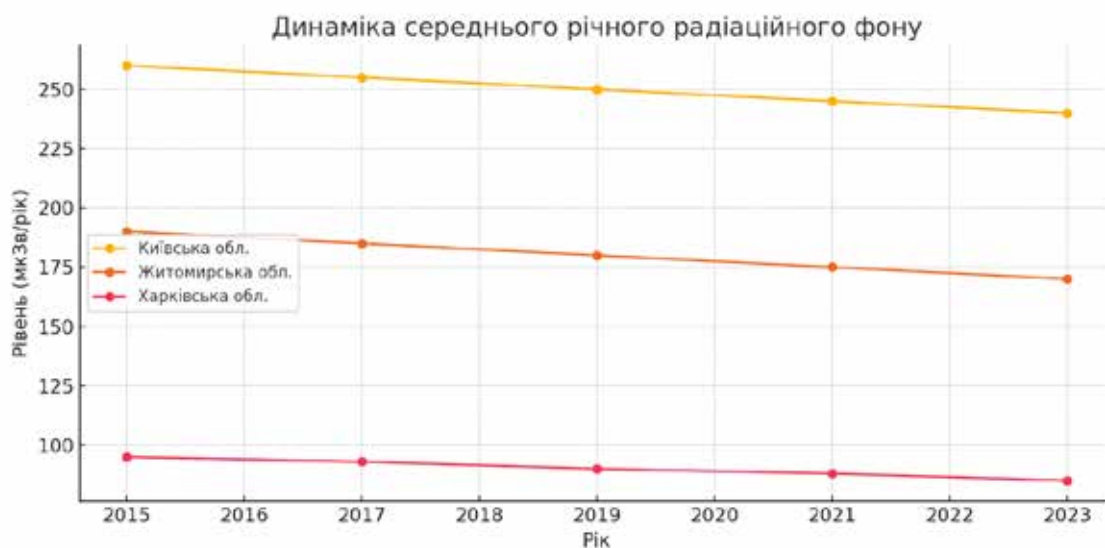
Графік 2 ілюструє, що основним джерелом техногенного радіоактивного забруднення є атомні електростанції (50%), значна частка також припадає на промисловість (25%) і військову діяльність (15%). Медична сфера становить найменшу частку (10%), однак потребує належного контролю [7].

У ХХІ столітті екологічна безпека стала одним із ключових напрямів державної політики, зокрема в умовах зростання техногенних загроз. Особливо небезпечним є радіоактивне забруднення довкілля, що виникає внаслідок діяльності атомних електростанцій, військово-промислових об'єктів, аварій, випробувань, а також поводження з радіоактивними відходами. Це створює постійну потребу в ефективному правовому регулюванні в сфері радіоекології.

Природоохоронне законодавство України охоплює низку нормативно-правових актів, що визначають вимоги до безпеки поводження з джерелами іонізуючого випромінювання, норми екологічного контролю та відповідальність за екологічні правопорушення. Основу становлять такі акти як: Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (1991); Закон «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» (1995); Кодекс України про адміністративні правопорушення; Кримінальний кодекс України [8].

З практичної точки зору, природоохоронне законодавство дозволяє реалізувати такі механізми мінімізації ризиків: створення санітарно-захисних зон навколо небезпечних об'єктів; здійснення постійного екологічного моніторингу; обмеження або заборона експлуатації застарілого обладнання; впровадження новітніх технологій з очищення та ізоляції радіоактивних відходів.

Особливої уваги потребують території, що постраждали внаслідок аварій, зокрема



Графік 1. Динаміка середнього річного радіаційного фону

Частка джерел радіоактивного забруднення



Графік 2. Частка джерел радіоактивного забруднення

Чорнобильська зона відчуження. Тут законодавство регламентує спеціальний режим діяльності, порядок доступу, обліку радіоактивного забруднення та відселення населення.

Таким чином, природоохоронне законодавство виступає фундаментом національної системи екологічної безпеки. Його ефективне функціонування можливе лише за умови належного правозастосування, міжвідомчої координації, а також активної участі громадськості у контролі за дотриманням екологічних норм.

Головні висновки. Природоохоронне законодавство України є важливим інструментом у сфері регулювання техногенних радіаційних загроз. Завдяки наявності спеціалізованих нормативно-правових актів, таких як закони про ядерну безпеку, охорону довкілля та захист від іонізуючого випромінювання, держава забезпечує правове регулювання поведінки з джерелами радіації, радіоактивними відходами, а також здійснює контроль за діяльністю потенційно небезпечних об'єктів.

Динамічний розвиток атомної енергетики та інтенсивне використання джерел іонізуючого випромінювання у промисловості, медицині, науці створюють постійний виклик для правової системи. Законодавство має враховувати як технічні інновації, так і глобальні екологічні ризики. Особливого значення набуває постійний перегляд і адаптація норм до нових реалій та міжнародних зобов'язань. Україна, як держава, що має досвід ядерних ката-

строф, зобов'язана вживати підвищених заходів обережності. Серед них – розширення екологічної експертизи, впровадження принципу «забруднювач платить» і формування екологічної відповідальності підприємств.

Законодавчі ініціативи повинні підтримуватися науковими дослідженнями у сфері радіоекології. Пріоритетом має бути запровадження електронних систем обліку радіоактивних матеріалів і відходів, автоматизованих систем моніторингу навколишнього середовища. Не менш важливим є розвиток інфраструктури для безпечного зберігання та захоронення радіоактивних матеріалів. Це включає будівництво сховищ, контроль за умовами зберігання та регулярну оцінку їх безпечності.

У межах міждержавного співробітництва Україна повинна активно брати участь у міжнародних екологічних проєктах, обміні даними та досвідом, зокрема з країнами Європейського Союзу. Спільні ініціативи з розробки стандартів, технічної підтримки та екологічної оцінки дозволяють підвищити рівень захисту довкілля та гармонізувати українське законодавство із європейськими нормами [9].

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження щодо ролі природоохоронного законодавства у регулюванні техногенних радіаційних загроз можуть бути корисними для вдосконалення нормативно-правової бази у сфері екологічної та радіаційної безпеки. Вони можуть слугувати основою для розробки практич-

них рекомендацій органам державної влади, зокрема Міністерству захисту довкілля та природних ресурсів України, а також органам місцевого самоврядування щодо підвищення ефективності контролю за джерелами радіаційного забруднення. Крім того, результати мають практичну цінність для розробки навчальних програм у закладах вищої освіти, зокрема у галузях екології, права та ядерної безпеки. Наукові

висновки можуть бути використані для посилення екологічної складової в процесі прийняття управлінських рішень, формування державної екологічної політики та в процесі адаптації українського законодавства до вимог Європейського Союзу. Також ці результати можуть стати підґрунтям для подальших досліджень у сфері радіоекології та запобігання техногенним катастрофам [10].

Література

1. Андросов А. І., Коваль Г. В. Основи ядерної та радіаційної безпеки. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 312 с.
2. Грищенко І. М., Литвиненко Ю. В. Радіаційна екологія. Київ: Ліра-К, 2017. 256 с.
3. Жижченко І. А. Радіоекологія: підручник. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2019. 284 с.
4. Лисенко О. В. Радіаційна безпека: законодавство і практика. Одеса: Фенікс, 2019. 245 с.
5. Парахненко В. Г., Мандебура С. В. (уклад.) Радіоекологія: навч.-метод. посіб. для студ. денної форми навч. на пряму підготов. 101 «Екологія» (освітній ступінь «бакалавр») МОН України, Уманський держ. пед. ун-т. імені Павла Тичини. Умань: Візаві, 2024. 199 с.
6. Савицький В. І., Климів С. В. Правове забезпечення екологічної безпеки. Харків: Право, 2021. 274 с.
7. Суботін В. М. Техногенні загрози та цивільний захист. Дніпро: НГУ, 2020. 198 с.
8. Тулєв А. О. Радіоекологія та радіобіологія: навчальний посібник. Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 2016. 228 с.
9. Парахненко В. Г., Гончарук В. В., Подзерей Р. В. Управління ресурсно-екологічною безпекою регіону в умовах радіоекологічних загроз та охорони природи. *Науково – практичний журнал «Екологічні науки»*. № 1 (58). 2025. С. 65-69.
10. Парахненко В. Г. Гончарук В. В. Методологія та організація екологічних досліджень у системі ландшафтної екології та радіоекологічного моніторингу територій, забруднених радіонуклідами. *Журнал Environmental Problems «Екологічні проблеми»* Львів. 2025; Volume 10, Number 2: pp. 119-126.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО ЗАРАЖЕННЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ НА ХІМІЧНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ

Кочанов Е.О.¹, Некос А.Н.¹, Безсонний В.Л.^{1,2}

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

²Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
пр. Науки, 9А, 61165, м. Харків

kochanov@karazin.ua, nekos@karazin.ua, bezsonny@gmail.com

Обґрунтовано необхідність створення більш адаптивних підходів до моделювання зони ураження, оскільки чинні емпіричні й напівемпіричні моделі не враховують топографічну складність місцевості, змінність метеорологічних умов та особливості середовища. Представлена модель дозволяє врахувати механізми утворення як первинної (імпульсне викидання з розливу ємності), так і вторинної хмари (випаровування з поверхні розливу) небезпечних речовин. Вперше до моделі включено вплив ефективної шорсткості підстилаючої поверхні (параметр z_0), що забезпечує підвищену точність розрахунку глибини хмар розповсюдження. Також враховано змінну вертикальну стійкість атмосфери та швидкість приземного вітру. Описано ключові параметри моделі: площа розливу, інтенсивність випаровування, глибина та тривалість хімічного зараження, доза токсичного впливу на населення. Окрема увага приділена процедурі розрахунку часу підходу хмари до заданого рубежу з урахуванням швидкості вітру та відстані до населених пунктів чи об'єктів критичної інфраструктури. Запропоновані розрахункові формули враховують фізико-хімічні властивості СДОР, що дозволяє адаптувати модель до різних речовин та умов їхнього поширення. Визначено можливості інтеграції розробленої моделі до систем підтримки прийняття рішень у сфері цивільного захисту. Продemonстровано потенціал використання моделі у прогнозуванні хімічної обстановки, оптимізації планів евакуації та визначенні зон санітарного захисту. Наведено порівняльний аналіз з іншими сучасними дослідженнями у сфері екологічної безпеки, зокрема щодо врахування складного рельєфу, багатокомпонентності викидів та адаптації до змін кліматичних умов. Отримані результати дозволяють підвищити ефективність реагування на техногенні аварії та мінімізувати ризики для здоров'я населення. *Ключові слова:* математичне моделювання; хімічне зараження; екологічна безпека; цивільний захист; первинна і вторинна хмара; прогнозування зони ураження; ефективна шорсткість.

Mathematical modeling of chemical contamination for environmental hazard assessment at hazardous chemical facilities.
Kochanov O., Nekos A., Bezsonnyi V.

The need for adaptive modeling approaches is substantiated, as existing empirical and semi-empirical models often neglect key influencing factors such as terrain complexity, atmospheric instability, and urban surface effects. The proposed model accounts for both the primary (instantaneous release due to container rupture) and secondary (evaporation from surface spill) contamination clouds. A novel contribution of the model is the integration of effective surface roughness (z_0) as a governing parameter, significantly improving the accuracy of the predicted cloud dispersion depth. Variable wind speed and atmospheric stability classes are also incorporated into the calculations. Key model parameters include spill area, evaporation intensity, contamination duration and depth, and toxic exposure dose for populations. The model also includes a procedure for estimating the cloud travel time to a designated boundary, factoring in wind speed and distance to settlements or critical infrastructure. The calculation framework incorporates substance-specific physical and chemical properties, which allows model adaptation to various toxic agents and dispersion scenarios. The paper also outlines prospects for implementing the model in decision support systems (DSS) for civil protection. Its use is demonstrated for forecasting chemical hazards, optimizing evacuation plans, and determining sanitary protection zones. A comparative overview with contemporary research is provided, focusing on terrain-sensitive modeling, multi-phase release mechanisms, and climate-adjusted scenarios. The results affirm the model's potential to enhance emergency response effectiveness and reduce public health risks during chemical incidents. *Key words:* mathematical modeling; chemical contamination; environmental safety; civil protection; primary and secondary cloud; hazard zone forecasting; surface roughness; meteorological parameters.

Постановка проблеми. Розвиток хімічної промисловості, зростання обсягів виробництва, транспортування і зберігання небезпечних речовин значно підвищують рівень техногенної загрози для населення та довкілля. Особливої уваги потребують хімічно небезпечні об'єкти (ХНО), на яких можливі аварійні викиди токсичних речовин – аміаку,

хлору, сірководню та інших. У разі порушення цілісності ємностей або трубопроводів виникають масштабні зони хімічного зараження, які поширюються залежно від метеорологічних умов, рельєфу місцевості, характеру поверхні та фізико-хімічних властивостей речовин. Сучасна система цивільного захисту потребує надійних методів оцінки хіміч-

ної обстановки у режимі реального часу, з урахуванням різноманітних чинників, які впливають на формування первинної та вторинної хмари зараження. Існуючі емпіричні та напівемпіричні моделі, що застосовуються в оперативній діяльності, не завжди забезпечують достатню точність прогнозів, особливо в умовах складного рельєфу чи міського середовища. Це створює значні труднощі в організації евакуаційних заходів, визначенні зон ураження, прийнятті рішень щодо засобів колективного та індивідуального захисту.

Актуальність дослідження. Наразі в Україні функціонує велика кількість потенційно небезпечних об'єктів, на яких зберігаються тони токсичних речовин. Водночас засоби прогнозування зон ураження застарілі або ґрунтуються на спрощених моделях, які не враховують динамічні параметри атмосфери, поверхневу шорсткість, складний рельєф місцевості та багатокомпонентну природу викидів. Це обмежує можливості швидкого та обґрунтованого прийняття рішень з боку органів цивільного захисту, особливо у випадку раптових аварій. Окрему важливість становить підвищення точності оцінки зони хімічного зараження у складних природно-географічних умовах, таких як гірські райони, прибережні зони, території з розвинутою міською інфраструктурою. В таких умовах звичайні евристичні або аналітичні методи демонструють значні відхилення від фактичного поширення хмари небезпечної речовини. Таким чином, розробка адаптивної математичної моделі, яка враховує фізико-хімічні властивості речовин, топографічні та атмосферні чинники, а також параметри об'єкта-джерела зараження, є вкрай актуальною з погляду як наукових досліджень, так і практичних потреб оперативного реагування в системі цивільного захисту.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки на період до припинення або скасування воєнного стану в Україні (напрямок 5 «раціональне природокористування») затвердженими Законом України № 3534-ІХ від 21.12.2023; Національному плану дій з охорони навколишнього природного середовища на 2023–2025 рр., затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2021 р. № 443-р. та Державній цільовій екологічній програмі проведення моніторингу навколишнього природного середовища, затвердженій Постановою Кабінету Міністрів України від 5 грудня 2007 р. № 1376.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Моделювання поширення небезпечних хімічних речовин та оцінка зон ураження є предметом активного наукового інтересу у зв'язку з необхідністю підвищення ефективності реагування на аварії на хімічно небезпечних об'єктах. Загальними питаннями дослідження хімічного зараження на ХНО, при-

свячені праці М. І. Адаменка [1], Б. М. Данилишина [2], Н. Г. Кчук [3], А. В. Степаненка [4]. Значну увагу приділено способам просторового представлення середовища, зокрема Bellos і Tsakiris [5] порівняли різні методи врахування будівель у моделюванні двовимірного потоку і встановили, що метод «відбиткових меж» забезпечує найвищу точність у міських умовах. У сфері оцінки ризику для здоров'я від хімічного впливу важливим є дослідження López-Roldán та ін. [6], у якому представлено підхід до оцінки глобального індексу ризику на основі токсикологічних характеристик забруднюючих речовин у воді. Запропонований індекс можна адаптувати для кількісної оцінки ризику при аварійному хімічному зараженні повітря. Yoo і Choi [7] зосередилися на евакуації населення під час витоків хімічних речовин, застосувавши ГІС-моделювання для створення карти ризиків у реальному часі. Li та ін. [8] запропонували нейромережеву модель раннього попередження для нафтохімічного парку, що функціонує на ізольованій території. Робота Zhang та ін. [9] є одним із перших систематичних досліджень, де застосовано CFD-моделювання для поширення токсичних газів у складному гірському рельєфі з попередньою генерацією сітки на основі ГІС-даних. Xie та ін. [10] розробили комплексну методику, яка поєднує аеродинамічні експерименти, CFD-моделювання та теорію ризику для оцінки поширення змішаного природного газу з вмістом сірководню. Zografos та ін. [11] запропонували структуру системи підтримки прийняття рішень у випадках надзвичайних ситуацій із залученням небезпечних речовин. Аналіз останніх досліджень свідчить про зростаючу увагу до розробки просторово чутливих, адаптивних моделей хімічного поширення, здатних інтегруватися з ГІС-технологіями, CFD та елементами штучного інтелекту для прийняття рішень у режимі реального часу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Більшість існуючих моделей використовують спрощене уявлення про навколишнє середовище, нехтуючи такими критичними факторами, як шорсткість підстилаючої поверхні, мікрорельєф та наявність перешкод, які суттєво впливають на структуру повітряних потоків та просторову конфігурацію зони ураження. Також обмежено враховується динаміка процесу формування вторинної хмари, що виникає внаслідок випару розлитої речовини з поверхні, особливо у випадках із тривалим випаровуванням або фазовими переходами. У типових аналітичних моделях вторинне зараження часто розглядається як рівномірне та однорідне джерело, що не відображає реальної складності процесу.

Наукова новизна

Новизна роботи полягає у формалізації багатфакторної моделі, що вперше враховує ефективну шорсткість підстилаючої поверхні (z_0) при оцінці

параметрів вторинної хмари, інтегрує змінні метеорологічні умови, включаючи вертикальну стійкість атмосфери та швидкість вітру та розрізняє механізми формування первинної та вторинної хмар, надаючи окремі розрахункові модулі для миттєвих і безперервних джерел викиду, що дозволяє точно змодельовати динаміку поширення речовини в часі.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Запропоноване в статті математичне моделювання хімічного зараження формує уніфікований підхід до оцінки хімічної обстановки, який інтегрує фізичні, хімічні, метеорологічні та топографічні параметри в єдину аналітичну схему, що дозволяє подолати обмеження існуючих спрощених моделей, орієнтованих переважно на умовно рівнинні території з постійними атмосферними умовами.

Викладення основного матеріалу. Для розробки методики оцінки хімічної обстановки необхідно розглянути процеси, що відбуваються в ході руйнування ХНО, для чого можливо використати сукупність існуючих математичних моделей, що описують джерело зараження, атмосферну дифузію домішок, вплив СДОР на населення та персонал виробництва.

Попереднім етапом розробки відповідної методики оцінки хімічної обстановки при руйнуванні ХНО, є побудова моделі процесу виникнення хімічних втрат населення та персоналу виробництва. Метою створення такої моделі є оцінка значень показників екологічної небезпеки хімічного зараження повітряного середовища при руйнуванні ХНО.

Показники масштабів хімічного зараження визначаються:

- радіусом (R_{np}) і площею (S_{np}) району руйнування;
- глибиною (G_1) і площею (S_1) зони поширення первинної хмари СДОР;
- глибиною (G_2) і площею (S_2) зони поширення вторинної хмари СДОР.

Показники тривалості хімічного зараження визначаються:

- часом випару СДОР з поверхні дзеркала розливу ($\tau_{вип}$);
- часом підходу хмари СДОР до заданого рубежу (t_n).

Показники небезпеки хімічного зараження оцінюються можливими хімічними втратами населення та персоналу виробництва в зонах екологічної небезпеки. Основною токсикологічною характеристикою СДОР є інгаляційна токсична доза. Можливі напрямки вирішення цього питання розглядаються у роботі [12].

При визначенні особливостей процесу хімічного зараження складових навколишнього середовища можливо сформулювати деякі гіпотези:

1. Умови формування первинної і вторинної хмар повітря заражених СДОР різні. Виходячи з умов формування хмар повітря заражених СДОР, варто

розглядати джерело зараження для первинної хмари, як миттєвий точковий, а для вторинної хмари, як безперервний точковий.

2. Умови поширення у повітрі хмари, зараженої СДОР, варто розглядати наступним чином: по-перше, це відстань, на який розглядається вражаюча дія СДОР. Для хмар повітря, заражених СДОР, ця відстань складає декілька кілометрів; по-друге, це висота, на якій поширюються хмари повітря заражені СДОР. Первинна і вторинна хмари поширюються на висоті не більше 150 метрів. Прийнято вважати, що у випадку ізотропної дифузії переніс речовин здійснюється горизонтальною складовою повітря в напрямку осі абсцис, інакше приземним шаром повітрям.

При розливі СДОР зі зруйнованих ємностей, рідина потрапляє, як правило, на вирівняну поверхню території сховища, тому набуває форму близьку до кола, що дозволяє оцінити площу району руйнування (S_{np}):

$$S_{np} = \pi \cdot R_{np}^2, \quad (1)$$

де R_{np} – радіус дзеркала розливу СДОР [м].

Або через співвідношення:

$$S_{np} = \frac{\pi \cdot d_{np}^2}{4}, \quad (2)$$

де d_{np} – діаметр дзеркала розливу, залежить від кількості СДОР, що пролилось зі зруйнованих ємностей. Наведемо вираз для оцінки діаметра дзеркала розливу, у залежності від кількості пролитого СДОР:

$$d_{np} = b \sqrt{\frac{Q - Q_1}{\rho}}, \quad (3)$$

де $b=1,22$ – при наявності обвалування, [м^{1/2}];

$b=5,04$ – при відсутності обвалування, [м^{1/2}];

ρ – щільність СДОР, [кг/м³];

Q – загальна кількість СДОР у ємності зберігання, [кг];

Q_1 – кількість СДОР, що перешли в первинну хмару, [кг].

Наближена оцінка кількості СДОР, що переходить в первинну хмару (Q_1), у момент розкриття оболонки може бути виконана по формулі, що наведена в роботі [14] і дозволяє використовувати наступні параметри:

$$Q_1 = \frac{Q C_v (t - t_k)}{\lambda}, \quad [кг], \quad (4)$$

де Q загальна кількість СДОР у ємності, [кг];

C_v – питома теплоємність рідини, [кДж/кг·град];

t – температура рідкого СДОР, [°C];

t_k – температура кипіння СДОР, [°C];

λ – питома теплота випару СДОР, [кДж/кг];

C_v, λ – для СДОР довідкові дані.

При визначенні глибини поширення первинної хмари СДОР за розповсюдження в приземному шарі повітря не враховувався вплив шорсткості підстила-

ючої поверхні землі на поширення хмари зараженої СДОР у повітрі. Для обліку впливу поверхні землі вводиться стандартний параметр z_0 , що дозволяє врахувати вплив шорсткості поверхні землі на поширення повітряних мас, з урахування зміни швидкості приземного вітру:

$$u' = u \cdot \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right), \quad (5)$$

де u' – значення горизонтальної складової швидкості приземного вітру з урахуванням впливу підстилаючої поверхні, [м/с];

u – середнє значення швидкості приземного вітру, [м/с];

z – висота поширення хмари СДОР, [м];

z_0 – ефективна висота для різних типів поверхонь, тобто геометричний параметр, пропорційний висоті елементів нерівностей земної поверхні, [м]. Значення параметра z_0 визначається з таблиці 1.

Тоді вираження для визначення глибини поширення первинної хмари прийме вид:

$$\Gamma_1 = b_1 \left(\frac{Q_1 \cdot 10^{-3}}{u' \cdot PC_{\tau_{50}}} \right)^{a_1}, \quad (6)$$

де Γ_1 – глибина поширення первинної хмари СДОР над рівнинною місцевістю, з урахуванням шорсткості підстилаючої поверхні, [м];

Q_1 – кількість СДОР, що переходить у первинну хмару, визначається з вираження (4), [кг];

$PC_{\tau_{50}}$ – середнє граничне значення токсодози, [гр·с/м³];

u' – горизонтальна складова швидкості приземного повітря з урахуванням підстилаючої поверхні, [м/с];

a_1, b_1 – безрозмірні коефіцієнти, що залежать від категорії вертикальної стійкості атмосфери, визначаються з наступних формул:

$$b_1 = 15,42 \cdot \exp(6,96 \cdot \varepsilon) \quad (7)$$

$$a_1 = 0,57 \cdot \exp(0,864 \cdot \varepsilon), \quad (8)$$

де ε – параметр вертикальної стійкості повітря, значення якого визначається в залежності від категорії вертикальної стійкості атмосфери за Пасквілем (А, В, С – конвекція; D – ізотермія; Е, F – інверсія): Е, F $\varepsilon = 0,2$; D $\varepsilon = 0$; А,В,С $\varepsilon = -0,2$ [15]

Іншим показником, що характеризує масштаби хімічного зараження, є глибина поширення вторинної хмари повітря зараженого СДОР. Кількість СДОР, що надходить у вторинну хмару, знаходиться з вираження:

$$Q_2 = Q - Q_1, \quad (9)$$

де Q – загальна кількість СДОР, [кг];

Q_1 – кількість СДОР, що перейшла в первинну хмару, [кг].

Значення Q_2 пов'язано з часом випару СДОР. При цьому мінімальний час випару цих речовин, у межах якого доцільно оцінювати глибину їхнього поширення, не повинне перевищувати однієї доби через велику мінливість напрямку вітру.

Наведемо формулу для визначення глибини поширення вторинної хмари, без обліку впливу підстилаючої поверхні землі на поширення хмари. Раніше зроблені допущення, дозволяють ввести параметр, що дозволяє враховувати вплив шорсткості земної поверхні.

$$\Gamma_2 = 16,84 \cdot \tau^{-0,51} \cdot b_2 \left(\frac{Q_2 \cdot 10^{-3}}{u' \cdot PC_{\tau_{50}}} \right)^{a_2}, \quad (10)$$

де Γ_2 – глибина поширення вторинної хмари повітря зараженого СДОР, [м];

$PC_{\tau_{50}}$ – середня гранична токсодоза, [м·с/м³];

Q_2 – кількість СДОР, що переходить у вторинну хмару, визначається з вираження (9), [кг];

Таблиця 1

Значення ефективної висоти (z_0) для різних типів поверхонь

Тип поверхні		z_0 , [м]
Дуже рівна, сніжна або крижана		10^{-5}
Рівний сніг на невисокій траві		$5 \cdot 10^{-5}$
Пустеля		$3 \cdot 10^{-3}$
Снігова поверхня при наявності чагарнику		$1 \cdot 10^{-3}$
Скошена трава, висота зрізу до 1,5 [см]		$2 \cdot 10^{-3}$
Скошена трава, висота зрізу до 3 [см]		$7 \cdot 10^{-3}$
Скошена трава, висота зрізу до 4,5 [см]		$2,4 \cdot 10^{-2}$
Висота трави 60-70 [см]	для $u \leq 1,5$ [м/с]	$9 \cdot 10^{-2}$
	для $1,6 \leq u \leq 3,5$ [м/с]	$6,1 \cdot 10^{-2}$
	для $3,6 \leq u \leq 6,5$ [м/с]	$3,7 \cdot 10^{-2}$
Неоднорідна поверхня, з переважаючими ділянками місцевості покритими травою, чагарником, деревами		0,1
Лісонасадженнями із середньою висотою дерев 10 [м], міська забудова		0,9

τ – час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу, [с];

a_1, b_2 – безрозмірні коефіцієнти, що залежать від категорії вертикальної стійкості повітря. a_1 – визначаються з виражень (7, 8), а b_2 – з вираження:

$$b_2 = 16,84 \cdot \exp(6,87 \cdot \varepsilon), \quad (11)$$

де ε – параметр вертикальної стійкості повітря, значення якого визначається, як: E, F $\varepsilon = 0,2$; D $\varepsilon = 0$; A, B, C $\varepsilon = -0,2$ [15];

u' – горизонтальна складова швидкості приземного вітру з урахуванням поверхні, [м/с].

До показників тривалості хімічного зараження відносяться: час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу і час підходу хмари повітря, зараженого СДОР до заданого рубежу.

Вражаюча дія СДОР залежить від часу випару СДОР з поверхні дзеркала розливу. Час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу залежить від погодних умов і фізико-хімічних властивостей цих речовин. Для визначення даного параметра використовується формула:

$$\tau_{\text{вип}} = \frac{Q_2}{E \cdot S_{\text{пр}} \cdot 3,6 \cdot 10^3}, \quad (12)$$

де $\tau_{\text{вип}}$ – час випару СДОР з поверхні дзеркала розливу, [с];

E – питома швидкість випару, [кг/м²·с]:

$$E = 0,041 \frac{u \cdot M}{d_{\text{пр}}^{0,14} \cdot T_u} \cdot \exp \left[\frac{\lambda \cdot M}{R} \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_u} \right) \right], \quad (13)$$

де M – молекулярна маса СДОР, [г/Мол];

$d_{\text{пр}}$ – приведений діаметр площі розливу, визначається з вираження (3), [м];

T_u – температура навколишнього повітря, [°C];

λ – питома теплоємність випару, [кДж/кг];

R – універсальна газова постійна, дорівнює 8,3, [кДж/кМол·К];

0,041 – коефіцієнт узгодження розмірності, [с·К·Мол/м^{0,86}·г];

T_k – температура випару СДОР, [°K].

Для своєчасного оповіщення населення про початок хімічного зараження і для оперативного виконання заходів щодо ліквідації наслідків аварії необхідно визначити час підходу хмари зараженого повітря об'єкту чи населеного пункту. Значення даного показника знаходиться за формулою:

$$t_n = 0,3 \frac{x}{u}, \quad (14)$$

де t_n – час підходу хмари повітря зараженого СДОР до заданого рубежу, [год];

x – відстань від зруйнованого хімічно небезпечного об'єкту до об'єкта оцінки обстановки, [км];

u – швидкість приземного повітря, [м/с];

0,3 – коефіцієнт для перерахування [м/с] у [км/год].

Головні висновки. Запропонована система оцінки хімічної обстановки при руйнуванні ХНО за рахунок розробленої формульної схеми (моделі) дозволяє:

- виконувати математичні формулювання реальних задач оптимального розподілу засобів ліквідації наслідків аварій на екологічно небезпечних об'єктах;

- враховувати різноманітний характер впливу негативних факторів на навколишнє середовище;

- можливість формування оптимального плану ліквідації наслідків аварії при заданому бюджеті, чи виконання певного плану відбору аналізів/проб при мінімальному бюджеті;

- можливість побудови оптимального розподілу засобів ліквідації наслідків в умовах невизначеності обставин, що склалися внаслідок аварії на ХНО.

Підхід до розробки формульної схеми дозволяє удосконаливати її в залежності від середовища програмування, що використовується.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження мають потенціал практичного застосування у сфері цивільного захисту, промислової безпеки, екологічного моніторингу та інженерного моделювання надзвичайних ситуацій, зокрема в автоматизованих системах оповіщення і реагування, які функціонують на рівні державних і регіональних центрів ДСНС для прогнозування зон ураження в режимі реального часу та у системах підтримки прийняття рішень для підвищення оперативності реагування при аваріях на ХНО, а також під час планування евакуаційних маршрутів та визначення пріоритетних заходів захисту населення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблення моделі шляхом інтеграції нестационарної метеорології, моделювання багатокомпонентних викидів, урахування хімічних реакцій речовин у повітряному середовищі, а також адаптації під сценарії біохімічного або комбінованого ураження.

Література

1. Адаменко М. І., Кучук Н.Г. Структура моніторингу екологічної безпеки регіонів України. *Методи підвищення ресурсу міських інженерних інфраструктур*. Тези за матеріалами VI Всеукраїнського наукового семінару 15-16 жовтня. Харків, 2014. С. 9-11.
2. Данилишин Б. М. Степаненко А.В., Ральчук О. М. Безпека регіонів України і стратегії її гарантування. Т. 1: Природно-техногенна (екологічна) безпека. К.: Наукова думка, 2008. 389 с.
3. Кучук Н. Г. Моделювання та аналіз екологічного стану регіонів України. *Науковий вісник будівництва*. Збірник наукових праць. Х.: Харківський національний університет будівництва та архітектури, 2014. № 3(77). С. 223-226.
4. Степаненко А. В. Стратегія прориву в соціально-економічному і технологічному розвитку України. *Продуктивні сили України*. 2009. № 1. С. 5-20. Режим доступу: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/handle/123456789/5892>.

5. Bellos V., Tsakiris G. Comparing various methods of building representation for 2D flood modelling in built-up areas. *Water Resources Management*. 2015. Vol. 29, № 2. P. 379–397. DOI:10.1007/s11269-014-0702-3
6. López-Roldán R., de Alda M. L., de Miguel N. et al. Assessment of the water chemical quality improvement based on human health risk indexes: Application to a drinking water treatment plant incorporating membrane technologies. *Science of the Total Environment*. 2015. Vol. 532. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.04.045.
7. Yoo B., Choi S.D. Emergency evacuation plan for hazardous chemicals leakage accidents using GIS-based risk analysis techniques in South Korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2019. Vol. 16, № 11. Article 1948. DOI: 10.3390/ijerph16111948.
8. Li G., Hong B., Hu H. et al. Risk management of island petrochemical park: Accident early warning model based on artificial neural network. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 9. Article 3278. DOI: 10.3390/en15093278.
9. Zhang B., Chen G., Kong L. Toxic gas dispersion modelling over complex terrains. *Proceedings of the 2009 International Conference on Energy and Environment Technology*. 2009. P. 488–492. DOI: 10.1109/ICEET.2009.499.
10. Xin B., Dang W., Yan X. et al. Dispersion characteristics and hazard area prediction of mixed natural gas based on wind tunnel experiments and risk theory. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021. Vol. 152. P. 278–290. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.012.
11. Zografos K.G., Vasilakis G.M., Giannouli I.M. Methodological framework for developing decision support systems for hazardous materials emergency response operations. *Journal of Hazardous Materials*. 2000. Vol. 71. P. 503–521. DOI: 10.1016/S0304-3894(99)00096-5.
12. Пахоменко В.Ф., Кочанов Е.О., Маркін П.В. Методика визначення хімічних втрат особового складу при руйнуванні хімічно небезпечних об'єктів. *Збірник наукових праць Харківського військового університету*. Х.: 2001. Вип. 7 (37). – С. 113–114.
13. Brandt M., Becker E., Jöhncke U. A weight-of-evidence approach to assess chemicals: case study on the assessment of persistence of 4,6-substituted phenolic benzotriazoles in the environment. *Environ Sci Eur*. 28, 4, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12302-016-0072-y>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ БІОТЕСТІВ ДЛЯ ЕКОТОКСИКОЛОГІЧНОЇ ОЦІНКИ НЕБЕЗПЕЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВІДХОДІВ

Крайнюков О.М., Проненко М.О.

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

У роботі розглянуто проблема з вибором біологічних тестів на екотоксичність з широкого спектру можливих варіантів.

Зростаючий обсяг відходів, що утворюються в усьому світі, створює значні екологічні проблеми, і належне управління ними є важливим для пом'якшення негативного впливу на екологічні системи. Відходи, що визначаються як речовини або предмети, які викидаються або призначені для викидання, можуть мати різні форми, включаючи побутові, промислові, сільськогосподарські та небезпечні відходи. Зі збільшенням виробництва відходів система класифікації та управління ними стала вирішальною для запобігання шкоді для навколишнього середовища.

З метою виявлення матеріалів, які можуть становити ризик для здоров'я людини та екосистем, класифікація відходів зазвичай базується на поєднанні фізичних, хімічних та біологічних властивостей. Серед різних властивостей, що використовуються для оцінки потенційної шкоди відходів, екотоксичність стала ключовим фактором у виявленні відходів, які становлять ризик для навколишнього середовища. Екотоксичність відходів стосується негайних або відкладених ризиків для екосистем, а також потенційних небезпек, що виникають через відходи, які потрапляють до навколишнього середовища. Таким чином, виявлення екотоксичних відходів є важливим кроком в управлінні та утилізації відходів.

Нормативна база в Європейському Союзі та Україні рекомендує визначати екотоксичність відходів, використовуючи такі три категорії: біологічні аналізи, хімічна класифікація та індекс безпеки. Однак методи та критерії тестування екотоксичності відходів відрізняються залежно від країни. Ці підходи не мають стандартизації, що призводить до невідповідностей у класифікації та управлінні відходами. Ці відмінності створюють труднощі для гармонізації управління відходами як у Європейському Союзі і Україні, так і в усьому світі. *Ключові слова:* відходи, забруднення, небезпечні властивості відходів, екотоксичність, біотестування, система біотестів.

Implementation of a biotesting system for ecotoxicological assessment of hazardous properties of wastes. Krainiukov O., Pronenko M.

The paper addresses the problem of selecting biological tests for ecotoxicity from a wide range of possible options.

The increasing volume of waste generated worldwide poses significant environmental challenges, and proper management is essential to mitigate the negative impacts on ecological systems. Waste, defined as substances or objects that are discarded or intended to be discarded, can take many forms, including municipal, industrial, agricultural, and hazardous waste. With the increase in waste generation, a system for classifying and managing them has become crucial to prevent harm to the environment.

In order to identify materials that may pose a risk to human health and ecosystems, waste classification is typically based on a combination of physical, chemical, and biological properties. Among the various properties used to assess the potential harm of waste, ecotoxicity has become a key factor in identifying wastes that pose a risk to the environment. The ecotoxicity of waste refers to the immediate or delayed risks to ecosystems, as well as the potential hazards arising from wastes released into the environment. Therefore, the identification of ecotoxic wastes is an important step in waste management and disposal. The regulatory framework in the European Union and Ukraine recommends determining the ecotoxicity of wastes using the following three categories: biological analyses, chemical classification and hazard index. However, the methods and criteria for testing the ecotoxicity of wastes vary from country to country. These approaches are not standardized, which leads to inconsistencies in waste classification and management. These differences create difficulties for harmonizing waste management both in the European Union and Ukraine, and worldwide. *Key words:* waste, pollution, hazardous properties of waste, ecotoxicity, biotesting, biotest system.

Постановка проблеми. У 2014 році держави-члени Європейського Союзу оновили Європейський перелік відходів (LoW) та визначили 15 небезпечних властивостей НР (НВ – в Україні) відходів, за винятком НР 14 «Екотоксичний» [1, 2]. Ця небезпечна властивість є найчастішою класифікаційною властивістю як небезпечна для відходів [3, 4], якщо використовується метод розрахунку класифікації, маркування та упаковки препаратів і сумішей (CLP Regulation, 2008).

Для перегляду різних підходів до оцінки НР 14 (на основі хімічного аналізу потоків відходів) Генеральний директорат з питань навколишнього середовища Європейської Комісії замовив оцінку чотирьох методів розрахунку НР 14 (Заклик до участі в тендерах: DG ENV, 2014).

Оцінювання цих методів зосереджено на так званих «дзеркальних записках» у списку відходів, тобто на відходах, які можуть бути як небезпечними, так і безпечними; тих, які необхідно оцінювати на пред-

мет їх небезпечних властивостей на основі їхнього хімічного складу або за допомогою біологічних випробувань.

Тим не менш, на рівні ЄС немає конкретних та чітких орієнтирів щодо експериментальних підходів до оцінки екотоксичності відходів. Фактично, Комісія поклала на держави-члени відповідальність за прийняття рішень у кожному конкретному випадку щодо використання біотестів для екотоксикологічної характеристики до отримання подальших вказівок ЄС (Повідомлення Комісії 2018/С 124/01).

Така ж ситуація склалася і в Україні, де у 2023 році прийнято Закон України «Про управління відходами» та Постанову Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів», але задля можливості здійснення об'єктивної та достовірної процедури оцінки відповідності визначення Н-фраз (Н4xx – небезпеки для довкілля) встановленим вимогам необхідно також проводити, на думку авторів, більш детальну екотоксикологічну оцінку небезпечних властивостей відходів.

Актуальність дослідження. Для просування циркулярної економіки необхідні ефективні методи оцінки небезпечності відходів. Наразі в Європі та Україні немає валідованого методу випробувань для найпоширенішої небезпечної властивості відходів – екотоксичності.

Небезпечні властивості (НВ) відходів у Європі визначені в Регламенті Комісії (ЄС) № 1357/2014 від 18 грудня 2014 року [2], за винятком НВ 14 «Екотоксичний», який зустрічається найчастіше [5]. Однак, за оцінками, більшість небезпечних (позначених тут як Н) позицій зі списку класифікуються як Н через екотоксичність, на основі гіпотези про загальні концентрації кислотності/лужності, окислювальних/відновних речовин, солоності або біодоступних екотоксичних речовин, які зазвичай зустрічаються в цих відходах. Генеральний директорат з питань навколишнього середовища у травні 2014 року опублікував пропозиції щодо розрахунку НВ 14 на основі хімічного складу відходів за допомогою різних методів. У незалежному дослідженні 120 видів відходів було проведено ранжування чотирьох запропонованих методів розрахунку та випробувано варіант із розширеними коефіцієнтами множення для найбільш екотоксичних речовин [6], який найкраще відповідає Європейському переліку відходів (LoW). Рішення про метод розрахунку без М-факторів було прийнято у 2017 році [7], де також зазначалося, що «результати (екотоксикологічних) випробувань мають переважати», та порушувалося питання щодо біодоступності речовин. Для цих методів розрахунку видоутворення елементів на мінеральні речовини має бути гіпотетичним, метод опанований лише кількома фахівцями, дорогий та підлягає оскарженню. У всіх випадках хімічний склад відходів (з видоутворенням елементів на мінеральні речовини) має бути відомий

для оцінки властивостей токсичності для людини. У хімічному регулюванні прийнято, що результати випробувань мають перевагу над результатами розрахунків [6].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У рамках оцінки впливу відходів на навколишнє середовище велика перевага тестів на токсичність полягає в застосуванні зваженого інтегрального індексу безпеки, який має бути більш реалістичним та якісним, ніж той, що визначається традиційними табличними підходами, які базуються лише на перевищенні вмісту окремих хімічних речовин та не враховує впливів хімічних речовин на біологічні організми.

Головним завданням українських фахівців, які працюють над проблемою достовірного та об'єктивного встановлення небезпечних властивостей відходів є впровадження напрацьованих європейськими колегами різних методичних підходів та їх ефективне поєднання із вітчизняними доробками [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Екотоксикологічні випробування можуть забезпечити класифікацію для НВ 14 без гіпотези щодо утворення багатоеlementної речовини, або у випадку невідомих (або нових) забруднювачів чи нанорозмірних форм речовин. Протягом останніх двадцяти років такі експериментальні підходи були розроблені в деяких європейських країнах, що найчастіше об'єднують водні та наземні екотоксичні випробування [9-12]. Існує домовленість щодо приготування елюатів та сумішей відходів з розбавленим субстратом для екотоксичних випробувань [13].

Проведення цих тестів на токсичність відповідає підходу «доза/відповідь», що означає, що різні кількості відходів (елюату або твердої речовини) змішуються з контрольним субстратом (наприклад, середовищем для культивування/розведення з відновленою водою або штучного ґрунту), і для кожної суміші вимірюється біологічний параметр. Доза – це частка відходів (рідких або твердих) у середовищі для культивування. Вимірюється глобальний біологічний ефект, незалежно від виду елементів, біодоступності, речовин та їхнього фізичного стану (розчинна фракція, наночастинки, мікрочастинки, масив тощо). Результати цих тестів можна виразити у вигляді значень EC_x . Значення EC_x – це концентрація рідини або фільтрату з твердих відходів або твердої речовини в суміші з контрольним субстратом, яка призводить до біологічного ефекту (зниження відносно контролю) на $x\%$, а саме на 20% або 50% росту, рухливості, розмноження тощо. EC_{50} 8% означає, що розведення 8% відходів у середовищі для культивування/розведення призводить до зниження рухливості на 50%. Для забезпечення порівнянності результатів випробувань підготовку елюатів (співвідношення рідина/тверда речовина = 10 л/кг сухої речовини, 24 год)

та сумішей відходів з контрольним субстратом слід проводити відповідно до [13, 14].

Насправді, у європейському підході не робиться чіткої різниці між оцінкою безпеки та ризику. Відходи слід класифікувати за безпекою та управляти ними з точки зору ризику в рамках їхнього передбачуваного використання або сценарію управління. Деякі екотоксикологічні тести розроблені як міні-оцінка ризику в неписаному сценарії управління відходами. Екотоксичність не є справді невід'ємною властивістю відходів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Для деяких небезпечних властивостей, що потребують тестування, ні методи випробувань, ні вимоги/граничні значення ще не були визначені на практиці. Тому розробка системи біотестів для визначення небезпечних властивостей відходів є вкрай необхідною та актуальною проблемою.

Новизна. У процесі проведення аналітичного огляду розглянуто різні методичні підходи з оцінки небезпечних властивостей відходів, які при практичному доопрацюванні можливо впровадити в українську систему поводження з відходами.

Методологічне або загальнонаукове значення. Навести рекомендації щодо впровадження системи біотестів для оцінки небезпечних властивостей відходів.

Викладення основного матеріалу. У Європейському Союзі небезпечні властивості відходів мають визначатися відповідно до Регламенту Комісії (ЄС) № 1357 (ЄС 2014). Однак донедавна не було вказано, як слід оцінювати властивість HP 14 («екотоксичні»: відходи, які становлять або можуть становити негайні чи відкладені ризики для одного або кількох секторів навколишнього середовища), але ця ситуація змінилася (Регламент Ради (ЄС) 2017/997). Фактично, можливі два підходи:

1. Оцінка відповідно до класифікації хімічних сумішей (підхід Класифікація, маркування та упаковка CLP – ЄС 2008);

2. Екотоксикологічні випробування відходів з використанням стандартних методів ISO.

Спочатку екотоксикологічний підхід був розроблений для оцінки забруднення ґрунтів. Він складався з набору водних та наземних тестів, результати яких оцінювалися разом. Нещодавно цей підхід був (з незначними змінами) використаний у Технічному звіті «Керівництво щодо використання екотоксичних тестів, що застосовуються до будівельних виробів» (CEN/TR 17105 (2017)).

Такий набір екотоксикологічних тестів був успішно використаний для різних відходів у Франції [15] та, зокрема, у міжнародному кільцевому тесті. Одним із результатів цього кільцевого тесту було використання трьох методів випробувань для елюатів відходів та трьох тестів для твердих відходів, але все ще існували певні сумніви щодо того, які саме

методи випробувань слід включити до набору тестів. З міркувань прийнятності та якості даних слід використовувати стандартизовані методи випробувань (бажано, ISO, CEN (Європейський комітет з нормалізації)). Також рекомендується, щоб будь-який набір тестів охоплював види з трьох основних груп трофічних організмів (мікроби, рослини та тварини), щоб охопити широкий спектр фізіологічних та екологічних властивостей.

Нарешті, кількість трьох методів випробувань на відсік (водні/елюати та наземні/тверді відходи) здається хорошим компромісом між загальним охопленням та практичністю (тобто зусилля з точки зору часу та витрат є керованими).

Небезпека відходів розраховується на основі їхнього складу, тобто шляхом додавання концентрацій усіх хімічних речовин з хронічною водною токсичністю (Регламент Ради. 2017/997 (ЄС 2017)). Однак відходи містять багато, часто невідомих хімічних речовин, і навіть якщо вони відомі, немає гарантії, що для них доступні екотоксикологічні дані. Крім того, не враховується взаємодія між окремими компонентами відходів. Однак, згідно з нещодавнім Регламентом Ради, у випадку проведення екотоксикологічних випробувань з відповідними відходами, їх результати матимуть переважну силу (ЄС 2017).

Таким чином, рекомендації ЄС щодо оцінки HP 14 все ще базуються на законодавстві CLP для хімічних речовин загалом, але існують деякі труднощі у використанні цієї методології. Дійсно, CLP пов'язаний з чистими хімічними речовинами та їх стабільними сумішами, тоді як відходи можуть містити різноманітні речовини зі змінним складом [5]. Крім того, цей підхід вимагає інформації про речовини, але склад відходів часто оцінюється з урахуванням вмісту окремих елементів [5], а взаємодія цих елементів може бути невідомою. Отже, зазвичай розглядається консервативний «найгірший сценарій», який допускає негативний вплив на навколишнє середовище хімічної форми для кожного елемента [5]. Такий підхід часто призводить до переоцінки екотоксичності. Ще однією проблемою є нереалістичне припущення, що загальний вміст сприяє потенційній екотоксичності, оскільки не весь вміст елементів є біодоступним [16, 17]. Зрештою, може бути важко ідентифікувати конкретні органічні речовини у відходах, і тому екотоксичність може бути недооцінена. Різні автори визнали вилуговування основним шляхом екотоксичності, відповідно до регламенту CLP, і запропонували методи оцінки HP 14, засновані на даних вилуговування та моделюванні геохімічного видоутворення, щоб визначити, які конкретні мінерали/речовини можуть бути присутніми у відходах, та їх вилуговування за вибраного значення рН. Однак, слід також оцінити пряму екотоксичність щодо ґрунтових екосистем. Екотоксичний вплив речовин, нерозчинних у воді, може бути недооцінений, якщо розглядати лише водний відсік, і тому

наземний відсік є актуальним, особливо для оцінки гідрофобних відходів.

Біотестування відображає вплив усіх речовин, їх взаємодії (адитивні, антагоністичні та синергетичні), а також біодоступну фракцію зокрема [11]. Таким чином, оцінка екотоксичності за допомогою біотестів є дуже актуальним підходом до класифікації відходів, оскільки він охоплює всю складну матрицю в цілому. Для більш повної оцінки НР14 бажано рекомендувати використовувати ряд біотестів, включаючи тести як у водних, так і в наземних середовищах з організмами різного трофічного/функціонального рівня, з урахуванням різних типів ефектів (наприклад, фізіологічних та поведінкових) та різних сценаріїв впливу.

Обговорення ефективності біотестових систем є актуальним питанням, яке може сприяти впровадженню цього підходу. Зокрема, тривалість біотестів та обсяг необхідних лабораторних ресурсів є ключовими факторами, які слід враховувати, прагнучи широкого впровадження екотоксикологічної оцінки відходів. Тривалість випробувань є важливою змінною, оскільки різні підприємства мають завжди намір уникати тривалого зберігання відходів. Крім того, обсяг необхідних лабораторних ресурсів визначатиме зручність застосування цих тестів у різних лабораторіях, а отже, і прийняття такого підходу.

Головні висновки. Вдосконалення підходів до екотоксикологічного тестування, які були запропоновані для оцінки НР 14 у різних країнах, є вкрай важливою проблемою. Ефективність біотестів є ключовою ланкою для мотивації впровадження в промисловості та включення їх до законодавчого поводження з відходами. Зміни в законодав-

стві в цьому відношенні, ймовірно, призведуть до значного впливу на управління відходами, спрямованого на належне налаштування відповідних заходів для захисту навколишнього середовища. Удосконалення екотоксикологічної оцінки не тільки сприяє оцінці небезпечних властивостей відходів в різних країнах світу, але й надає корисну інформацію, яка може бути використана для покращення алгоритму проведення екотоксикологічних досліджень відходів.

Перспективи використання результатів дослідження. Оцінка кожної з небезпечних властивостей відходів базується на вмісті потенційно небезпечних речовин або на результаті випробування певної властивості. Визначення небезпечних властивостей відходів тільки за допомогою ідентифікації чистих хімічних речовин та сумішей чистих хімічних речовин, які знаходяться у складі відходів є недосконалим алгоритмом. Відходи зазвичай складаються із суміші численних речовин. У багатьох випадках приблизний склад відходів може бути відомий з точки зору елементарних складових, тоді як фактичні форми (речовини/сполуки), в яких вони присутні, часто є значною мірою невідомими. Існує суттєва потреба в розробці рекомендацій та сучасних підходів у цій галузі. Для деяких небезпечних властивостей, що потребують тестування, ні методи випробувань, ні вимоги/граничні значення ще не були визначені на практиці. Включення біотестування до оцінки екотоксичності відходів є ще одним (новим) викликом, який вимагає розробки практичних та застосовних процедур та впровадження нової методології щодо оцінки небезпечності відходів та їх впливу на навколишнє середовище.

Література

1. EU 2014a. Commission Decision 2014/955/EU of 18 December 2014 amending Decision 2000/532/EC on the list of waste pursuant to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Union. 30.12.2014. L 370/44. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0955&rid=1>
2. EU 2014b. Commission Regulation (EU) No 1357/2014 of 18 December 2014 replacing Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives. Official Journal of the European Union. 19.12.2014. L 365/89. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R1357&rid=1>
3. Про управління відходами: Закон України від 29.06. 2023 р. № 2320-IX / Відомості Верховної Ради України. Київ: Парлаи. вид-во, 2023. 25с. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#n987> (дата звернення: 15.11.2024).
4. Про затвердження Порядку класифікації відходів та Національного переліку відходів : Постанова Кабінету Міністрів України від 20.10.2023р. № 1102. *Офіційний вісник України*. 2023. № 4. С. 530–543.
5. Hennebert P., Hans A. van der Sloot, Rebischung F., Weltens R., Geerts L., Hjelmar O. Hazard property classification of waste according to the recent propositions of the EC using different methods, *Waste Management*, Vol. 34, Is. 10. 2014. pp. 1739-1751. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.021>.
6. CLP 2008. Regulation (EC) n 1272/2008 of the European parliament and of the Council of 16 December 2008 on classification, labelling and packaging of substances and mixtures, amending and repealing Directives 67/548/EEC and 1999/45/EC, and amending Regulation (EC) No 1907/2006. 31.12.2008. Official Journal of the European Union L 353/1. Last update <https://echa.europa.eu/fr/regulations/clp/legislation>
7. EU 2017a. Council Regulation (EU) 2017/997 of 8 June 2017 amending Annex III to Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council as regards the hazardous property HP 14 «Ecotoxic». Official Journal of the European Union. 14.6.2017. L 150/1. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0997&rid=1>
8. Крайнюков О. М., Кривицька І. А., Житнецький І. В. Токсикологічна оцінка якості очищення бурових стічних вод. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 28. С. 83-90. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-28-07>

9. Крайнюков О.М., Кривицька І.А., Найдьонова О.Є., Лукаш М.С., Лукаш К.М. Впровадження методу біотестування задля оцінки небезпечних властивостей відходів. *Екологічні науки. науково-практичний журнал. Видавничий дім «Гельветика»*. № 5(56). 2024, с. 198-202 <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.30>
10. Hennebert P., Humez, N. Conche I., Bishop I., Rebischung F. Assessment of four calculation methods proposed by the EC for waste hazardous property HP 14 «Ecotoxic», *Waste Management*, Vol. 48. 2016. pp. 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.044>.
11. Römbke, J. Testing of 24 potentially hazardous wastes using 6 ecotoxicological tests. *Detritus*, 4, 2018. p. 4-21. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13745>
12. Römbke, J., Jänsch, S., Meier, M., Hilbeck, A., Teichmann, H., & Tappeser, B. General recommendations for soil ecotoxicological tests suitable for the environmental risk assessment of genetically modified plants. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6(2), 2010. p. 287-300. <https://doi.org/10.1897/IEAM.2009-043.1>
13. EN 14735:2006. Characterization of waste – Preparation of waste samples for ecotoxicity tests. CEN, Belgium.
14. Römbke J., Aira M., Backeljau T., Breugelmans K., Domínguez J., Funke E., Graf N., Hajibabaei M. DNA barcoding of earthworms (*Eisenia fetida/andrei* complex) from 28 ecotoxicological test laboratories, *Applied Soil Ecology*, Vol. 104. 2016. pp. 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.02.010>.
15. Pandard P., Devillers J., Charissou A.-M., Poulsen V., Jourdain M. Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes, *Science of The Total Environment*, Vol. 363, Iss. 1–3. 2006. pp. 114-125. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.12.016>.
16. Mankinen K., Nurmesniemi H., Pöykiö R. Total and extractable non-process elements in green liquor dregs from the chemical recovery circuit of a semi-chemical pulp mill, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 166, Is. 3. 2011. pp. 954-961. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.11.082>.
17. Nurmesniemi H., Pöykiö R., Perämäki P., Kuokkanen T. The use of a sequential leaching procedure for heavy metal fractionation in green liquor dregs from a causticizing process at a pulp mill, *Chemosphere*, Vol. 61, Is. 10. 2005. pp. 1475-1484. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.04.114>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

DRIVERS OF FAST FASHION CONSUMPTION PRACTICES AND ECOLOGICAL FOOTPRINT GROWTH

Radomska M.M.¹, Klymenko N.A.²

¹Kyiv Aviation Institute

L. Huzar Ave., 1, 03058, Kyiv

²Faculty of Environmental Protection

Trg mladosti 7, 3320, Velenje, Slovenia

m.m.radomskaya@gmail.com

The analysis of the main environmental impacts of the fashion industry at various stages of the textile product life cycle, supported by carbon and water footprint data was conducted. The life-cycle of clothing from raw materials acquisition to landfill is deeply resource-intensive and generate pollution at each stage. The main factors contributing to environmental degradation include high water consumption, toxic pollution from textile processing, greenhouse emissions at all stages of production, as well as during transportation, storage and retailing, and the massive accumulation of textile waste. The synthesis of research data on the ecological footprint to a range of clothes items was conducted and demonstrated considerable difference in assessment approaches applied, lack of standard methodology and relatively high ecological footprint of both naturally produced and synthetic items. Interviews with a sustainable designer and former managers at fast fashion brands provided valuable insights into real-world practices of fast fashion promotion and combating. The brands under study were found to adhere to typical fast fashion models characterized by rapid turnover, globalized production and weak environmental practices, suggesting that existing green initiatives remain largely superficial or marketing-oriented. The findings also confirm that small-scale upcycling initiatives can significantly reduce resource use and emissions, offering viable alternatives to mass production. Main recommendations for sustainable wardrobe formation are provided, as well as strategic options for the whole industry. The general conclusion of the research is that major fashion brands are still largely engaged in unsustainable practices, but there are effective and efficient countermeasures at both the individual and industrial levels. Recycling and conscious consumption are highly effective personal strategies, while institutional changes in materials, design and business models offer scalable pathways to sustainable fashion. *Key words:* fast fashion, textile industry, ecological footprint, life cycle assessment, upcycling, consumer behavior.

Рушійні фактори поширення швидкої моди та зростання її екологічного сліду. Радомська М.М., Клименко Н.А.

В роботі проведено аналіз основних впливів модної індустрії на навколишнє середовище на різних етапах життєвого циклу текстильного виробу, підкріплений даними про вуглецевий та водний слід. Життєвий цикл одягу від отримання сировини до захоронення на сміттєзвалищі є надзвичайно ресурсоемним та створюють забруднення на кожному етапі. Основними факторами, що сприяють погіршенню стану навколишнього середовища, є високе споживання води, токсичне забруднення від обробки текстилю, викиди парникових газів на всіх етапах виробництва, а також під час транспортування, зберігання та роздрібної торгівлі, а також масове накопичення непотрібного одягу. Було проведено синтез дослідницьких даних про екологічний слід для низки предметів одягу, який продемонстрував значну різницю в застосованих підходах до оцінки, відсутність стандартної методології та відносно високий вплив як природних, так і синтетичних виробів на довкілля. Інтерв'ю з дизайнером сталого розвитку та колишніми менеджерами брендів швидкої моди надали цінну інформацію про реальну практику просування та боротьби зі швидкою модою. Було виявлено, що досліджувані бренди дотримуються типових моделей швидкої моди, що характеризуються швидкою оборотністю, глобалізованим виробництвом та слабкими екологічними практиками, що свідчить про те, що існуючі зелені ініціативи залишаються значною мірою поверхневими або орієнтованими на маркетинг. Результати дослідження також підтверджують, що дрібномасштабні ініціативи з апсайклінгу можуть значно скоротити використання ресурсів та викиди, пропонуючи життєздатні альтернативи масовому виробництву. Надано основні рекомендації щодо формування сталого гардеробу, а також стратегічні варіанти для всієї галузі. Загальний висновок дослідження полягає в тому, що великі модні бренди все ще значною мірою займаються нестійкими практиками, але існують ефективні та дієві контрзаходи як на індивідуальному, так і на промисловому рівнях. Переробка та свідоме споживання є високоефективними особистими стратегіями, тоді як інституційні зміни в матеріалах, дизайні та бізнес-моделях пропонують масштабовані шляхи до сталого розвитку моди. *Ключові слова:* швидка мода, текстильна промисловість, екологічний слід, оцінка життєвого циклу (LCA), апсайклінг, поведінка споживачів.

Problem statement. Consumption practices are shaped by the impact of marketing strategies, economic systems and general level of development. At the same time, they define the magnitude of the society's impact on the environment. The current mode of consumption seems to be the most wasteful in human history. Even though the sustainable development and economic practices are being actively promoted, companies are able to

find new ways to push people towards excessive spending of natural resources, pursuing stable increase of their incomes. This is true for all parts of human life, including personal belongings, which they try to transform into disposable things. The notable example is the fashion industry, which has produced the phenomenon of "fast fashion" – a model of production and consumption focused on the mass production of cheap clothing with

a short lifespan. As a result, the global clothing market is experiencing unprecedented growth, accompanied by a catastrophic impact on the environment. According to international studies, the textile industry is one of the most resource-intensive and environmentally harmful sectors of the modern economy: it is responsible for up to 10% of global greenhouse gas emissions, consumes billions of cubic metres of water each year, pollutes water with chemicals and dyes, and causes the accumulation of textile waste, microplastics and toxic residues. It is extremely important to formulate and apply scientifically sound approaches to measuring the ecological footprint of clothing, as well as study the drivers of people's adherence to fast fashion.

Relevance of the problem. The problem is particularly acute in the context of sustainable development, the global climate crisis and the depletion of natural resources. Ignoring the environmental impact of the textile and fashion industry leads not only to environmental degradation, but also to human rights violations, increased social inequality and a decline in the quality of life in manufacturing countries. In this situation, a comprehensive study of the environmental footprint of clothing is particularly important. This will help in developing effective applied methodologies and contribute to the transformation of the fashion industry to sustainable direction. The relevance of the topic is also determined by the need to develop new management, design and consumer solutions that can reduce the environmental footprint of fast fashion and promote the transition to a circular economy. However, it is important to analyze the sustainability and environmental friendliness of alternative trends and practices to avoid wrong decisions.

Ukraine is actively working on integration to the European society, but Western culture is not perfect and it has its own shortcomings, such as overconsumption clearly embedded in fast fashion practices. So, it is important to detect such trends among population, define their driving forces and create means of their avoidance.

Novelty. The paper presents the comprehensive analysis of the fast fashion problem in terms of its environmental dimensions, fast fashion brands contribution to the problem and offers a range of possible solutions.

Applied importance. The results of the clothes footprint assessment can be used for the promotion of sustainable consumption practices among population, and giving them possibility avoid supporting fast fashion brands and trends.

Literature review. Fast fashion pollutes the environment at all stages of its life cycle, which includes production of raw materials, fabrication, sewing, distribution, purchase and use by the consumer, and disposal at the end of the life cycle [1].

The most intensive impact at the initial stage is production and treatment of fibers, where natural and synthetic ones do not have noticeable difference in terms of total destructive impact on the environment. The thing

is that natural fibers is resource intensive, in particular, water, land and agrochemicals. Recent data show that cotton accounts for about 4.7% of global pesticide use and about 10% of insecticide use, which is much higher than the share of agricultural land. It was also responsible for considerable amount of greenhouse emissions, which is estimated at 0.9 CO₂ per kg of cotton (to a larger extent due to nitrogen fertilizers) [2]. On the positive side, some initiatives, such as organic cotton, aim to reduce the use of chemicals, and technologies, such as the Better Cotton Initiative and GOTS certification, promote more sustainable and environmentally friendly practices to mitigate these impacts [3].

Synthetic fibres are petroleum-based products, and their production requires large amounts of electricity and heat, which leads to increased CO₂ emissions. For example, producing 1 kg of polyester can result in 5-9 kg of CO₂ emissions, depending on the energy source [4]. While it is a higher carbon footprint than that of cotton, production of synthetic fibres does not require as much water as cotton.

The conversion of fibres into yarn (spinning) and yarn into fabric (weaving/knitting) are mechanical processes that mainly require electricity to run machines and looms. These steps have a relatively lower environmental impact compared to fibre production and dyeing, but it is not negligible.

Dyeing and finishing textiles are among the most polluting stages of clothing production. In traditional dyeing, fabrics are treated with dyes, which often contain heavy metals or toxic organic compounds, fixatives, salts, acids or alkalis, detergents, enzymes, and softeners. This process is also water-intensive: it is estimated that 17-20% of global industrial water pollution, causing increased pH and chemical oxygen demand (COD), as well as heavy metals pollution [5]. Additionally, it is estimated that dyeing and finishing accounts for around 3% of global CO₂ emissions [6].

In addition to dyes, a wide range of chemicals are used in textile production – it is estimated that more than 1900 chemicals are used at different stages of textile production, many of which are hazardous. These include bleaching agents (chlorine or hydrogen peroxide), optical brighteners, pesticides/repellents to protect wool from moths, formaldehyde resins to prevent wrinkles, flame retardants, waterproofing agents (often per- and polyfluorinated substances, PFAS). These chemicals can be released or leached during production and then during use or disposal. Many of these substances are being regulated or phased out in the EU/US, but in unregulated environments they can still be used freely, increasing the toxic burden on the environment [7].

Turning fabric into clothing is less harmful compared to the previous stages, but sewing machines, lighting, ironing equipment, and climate control fans produce noticeable CO₂ emissions. If the garment is washed or laundered as part of the finishing process, it also involves water consumption and pollution.

The main problem in the cutting and sewing process is the generation of textile scraps: on average, 10-20% of fabric is lost during the cutting process [8]. With global fibre production of around 116 million tons in 2022, 10-15% cutting waste means that between 11 and 17 million tons of fabric is wasted in garment factories every year instead of becoming garments [9]. Some of this waste is recycled into industrial rags or low-quality insulation, but most is thrown away or incinerated. This is not only wasted material, but also wasted energy/water that went into the production of this fabric. Moreover, if the trimmings are synthetic, they contribute to the generation of plastic waste. If they are cotton, they emit greenhouse gases when they decompose and are landfilled [10].

Apart from environmental issues, garment factories often raise social sustainability issues such as hard labour conditions and low wages, which is a contradiction to sustainability principles as well. Usually, neglect of environmental protection is accompanied by worse labour practices due to desire for cheap production [11].

In terms of emissions, the production stage (from fibre to finished garment) is dominant in the overall carbon footprint of clothing: 70-80% of the total climate impact of clothing comes from production (including fibre, yarn, fabric and sewing), with the rest coming from the use and end-of-life stage [1].

After production, clothing has to be transported over long distances. The apparel supply chain is highly globalised. Most of the international transport of garments is carried out by cargo ships (container ships). Shipping is more carbon-efficient per tonne-kilometre than air transport, but the distances are huge and the volumes are even greater. Once in the consumer country, distribution centres and retail stores also have an impact on the environment. Warehouses consume electricity (lighting, heating, ventilation and air conditioning). Retail stores also consume energy for lighting, heating/cooling and electronics. Online retail shifts some of this impact to warehouses and delivery vehicles. However, online shopping has its own impacts such as packaging waste, shipping emissions [12].

Being a source of multiple impacts on the environment textile industry has increased its share in modern degradation of environment considerably due to fast fashion trends. A 2024 report states that clothing production has doubled since 2000, and consumers are buying 60% more clothes than they did 17 years ago, while keeping half as many. This throwaway culture is a defining feature of fast fashion's environmental impact – it multiplies waste and the demand for continuous resource extraction [13]. As a result, fashion's environmental impact has increased over the past 20-30 years due to accelerating production cycles and higher rates of consumption. In terms of global impact, the industry is now comparable to sectors such as oil and agriculture, which was not the case before [14]. If left unchecked, trends show further growth in fiber production and waste by 2030, which could exacerbate the problems.

One of the main characteristics of fast fashion is the extremely short cycle of design, production and delivery of products to stores. This continuous pursuit of novelty leads to the loss of value of clothes and its instant substitution, thus creating skyrocketing volumes of waste, sent to landfills, but not ending their impact on environment. Piles of discarded clothing produce emissions of toxic substances, microplastic pollution, and raises demand for waste textile management. For example, in the EU, consumers throw away around 5.8 million tonnes of textiles annually, and approximately 87% of this textile ends up in landfills or incinerated, with only 13% reused or recycled [15]. Many developing countries, like Ghana and Chile have become dumping grounds for used or unsold clothing. This puts pressure on waste management systems and stretches the capacity of landfills. However, minimal efforts are still made by producers to deal with it.

Natural fibers such as cotton, linen, wool and silk are biodegradable in the environment, but because landfills are often low-oxygen (anaerobic), these materials decompose. These decomposition processes release methane, a greenhouse gas that has more than 25 times the global warming potential of CO₂. Clothing made of polyester or nylon can stay in a landfill for hundreds of years without decomposing, taking up space and potentially leaching toxic additives and plastic.

By understanding trends and drivers of the situation, we can see that the environmental problems associated with fashion are systemic – they are rooted in its business model and consumer culture, which needs through study and development of correction actions despite the opposition of industry.

Methods and materials. The methodology for the assessment of environmental impacts of fast fashion should include both quantitative analysis (LCA, footprinting, carbon accounting) and qualitative understanding of the structural causes of environmental degradation associated with the industry. It is equally important to consider changes in consumer behavior, brand policies, and the impact of global trends on sustainable development, as the ecological footprint of clothing is not just a technical indicator, but also the result of socio-cultural and economic interactions.

The structure of the given research includes a list of tasks, each performed with relevant methodology. First of all, the analysis of a range of case studies on assessing the environmental footprint of different types of clothing was conducted and the issues of methodologies applied by the authors were studied.

The second task was to collect information from the staff of the leading fast-fashion brands on the brand environmental policy to evaluate their potential contribution to fast fashion. To obtain these data interviews were conducted to get the insider's view of the problem. The interviewing was also applied to study the possible alternatives to fast fashion, which in this case was upcycling, described from the perspective of a practicing designer.

This dual approach helped compare industrial-scale practices with sustainable alternatives on a micro level.

The first interview was conducted with a former employee of two leading fast fashion brands, Zara (Inditex) and Mango, who held managerial positions in several European and Middle Eastern countries. This interview focused on identifying internal sustainability practices, the frequency of collection renewals, the fate of unsold goods, and the real implementation of corporate environmental policies. The second interview was conducted with a young Ukrainian designer engaged in upcycling, creating new clothing items from second-hand materials. The objective was to understand the motivations, challenges, and environmental benefits of alternative, small-scale sustainable practices.

Both interviews were conducted in written form using a questionnaire format, allowing participants to respond in detail. The interviews followed a semi-structured format, meaning that a list of core questions was provided but respondents were free to elaborate and include additional relevant insights.

Results and discussions. A comprehensive assessment of the environmental footprint of clothing involves systematizing data on different types of impacts for the main categories of clothing, followed by an analysis of these indicators. This section presents a summary table with typical numerical indicators of carbon and water footprints for different clothing items. This data is based on LCA studies [16, 17] and water footprint assessment [18-20], which allows us to compare the environmental profile of different products with each other. Table 1 summarizes the carbon and water footprint per item for common clothing categories.

The table provides a comparative overview of the environmental impact of different types of clothing depending on the fibre composition. It is clear that natural fibre products generally have a higher water footprint, especially silk, which stands out with approximately 360,000 litres per scarf, significantly exceeding all other products. Cotton products, such as T-shirts and

jeans, also consume large amounts of water, while wool has moderate impact. In contrast, synthetic products, including polyester, acrylic and nylon clothing, typically have lower water consumption, but stand out in terms of carbon emissions. Notably, polyester jeans have an extremely high carbon footprint of approximately 35 kg CO₂e, which is close to that of cotton denim, indicating that blending fibres does not necessarily reduce environmental costs. These data highlight the complex trade-off between fibre types, emphasizing the need to choose more environmentally friendly materials in fashion.

The methodology of assessment, used in the mentioned papers varies in details, but mostly represents LCA, and carbon and water footprint assessments. However, the results obtained are quite different between the authors and the data given in this paper are illustrative. This demonstrates the need to develop standard methodology for the assessment of an integral ecological footprint for clothes and make it obligatory procedure for all fashion brands. Moreover, it should be added to the labels of clothes and thus help consumers make more responsible and motivated choices of garments. The researches note that quite often high-water-footprint materials are perceived as environmentally friendly by consumers [21], therefore, dissemination of relevant information via informative labeling will definitely contribute to the reduction of ecological footprint from each item and industry on the whole. Apart from choosing more sustainable products, it is also necessary to work on reducing the number of clothes owned by people, which is a top priority on the way to slow fashion.

To illustrate the involvement of famous brands in the fast fashion trends, interviews with the sales managers of Zara and Mango were conducted. The purpose of this interview was to find out the real state of implementation of environmental programs and daily sustainability practices in fast fashion retailers, as opposed to their public statements. The results of interviews were used to evaluate the sustainability vs. fast fashion contribution by the following criteria: the existence of sustainability

Table 1

Approximate values of the ecological footprint for different categories of clothing

Item (Fiber)	Carbon Footprint	Water Footprint
Cotton T-shirt	2.1 kg CO ₂ e	2,700 L
Cotton denim jeans	33.4 kg CO ₂ e	3,780 L
Wool sweater (Merino)	≈9.7 kg CO ₂ e	≈2,500 L
Silk scarf (mulberry silk)	36.0 kg CO ₂ e	≈360,000 L
Down-filled winter jacket	25.4 kg CO ₂ e	274 L
Polyester T-shirt	5.5 kg CO ₂ e	<1,000 L
Polyester dress	≈1.1 kg CO ₂ e	<1,000 L
Acrylic sweater	≈1.1 kg CO ₂ e	<1,000 L
Nylon jacket (windbreaker)	2.7 kg CO ₂ e	<1,000 L
Polyester-blend jeans	≈35 kg CO ₂ e	≈1,060 L
Acrylic scarf	≈1.1 kg CO ₂ e	<1,000 L

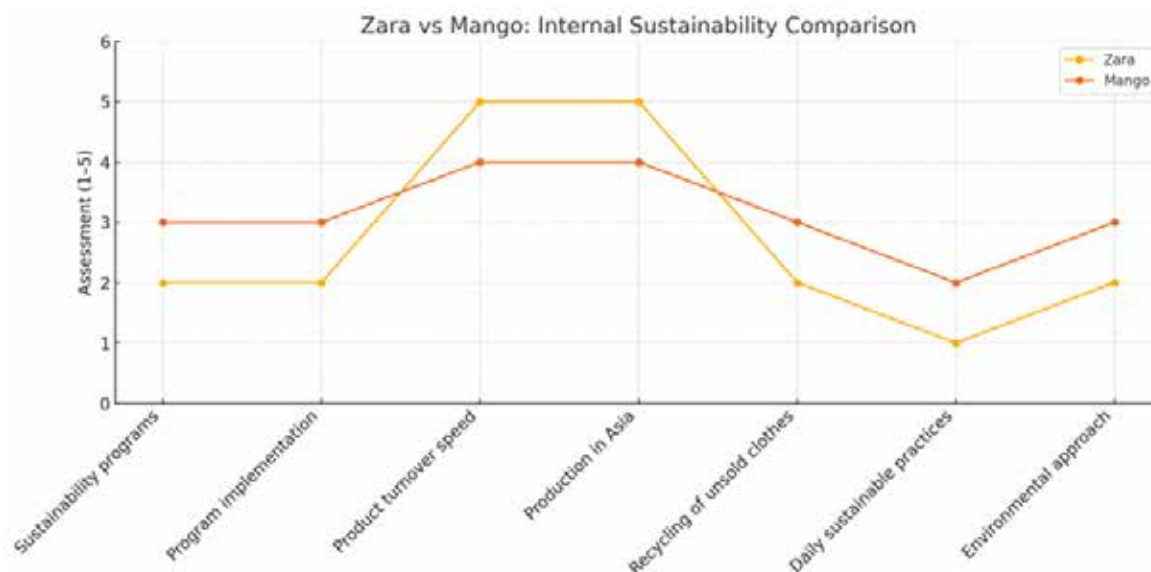


Fig. 1. Internal sustainability comparison for Zara vs Mango

programs, the actual implementation of these programs, the frequency of collection updates, the geography of production, the management of unsold goods, the existence of daily resource saving practices in stores, and the overall eco-strategy of the brand (Fig. 1). The interviewed ex-manager noted that Zara formally has many green programs (e.g. Zero Paper Waste, waste sorting, accepting used clothes from customers), but their actual effectiveness was low due to poor staff discipline and control. Mango did not have a clear environmental policy, and implemented only basic measures, such as collecting old clothes in stores and offering bonuses to customers through an app.

Neither brand systematically donated unsold clothes to charity. Zara tried to sell the leftovers through sales and outlets, while Mango mainly sold them through outlets, without organized recycling. Both companies had a very high turnover (Zara and Mango update their collections up to 2 times a week) and a high share of production in Asia, which generates a significant carbon footprint from logistics. There are almost no energy saving or waste reduction practices in the stores' daily operations (Zara had none at all, Mango had minimal ones). The answers were systematized in the form of a comparative assessment of the two brands for each criterion (scale of sustainability compliance from 1 to 5) and graphically presented for clarity. The results showed that both brands demonstrate a low level of actual sustainability, with Mango slightly ahead of Zara due to simple initiatives (e.g., a clothing collection programme).

The overall conclusion of the interviews is that at the level of fast fashion stores, sustainability is declarative or fragmented, not supported by systemic change. There is a considerable gap between brands' marketing claims and their actual actions.

In contrast, an interview with a designer involved in upcycling provided valuable insights into sustainable alternatives at the individual level. The practice of upcycling making new clothes from used materials diverts textile waste from landfills, but also significantly reduces carbon emissions, water consumption, and manufacturing waste. A quantitative comparison of traditional and upcycling scenarios (using 75 cotton T-shirts as an example) shows a reduction in greenhouse gas emissions by 97% and water saving by 81%.

Based on the data obtained the general strategy for shifting towards slow and circular fashion and reducing the environmental footprint could be offered, as well as practical recommendations for the implementation of sustainable practices at personal level. These include: buying fewer but higher-quality garments, choosing natural or recycled materials, extending clothing lifespan through repair, and supporting local or second-hand markets. These actions, when adopted on a larger scale, can significantly reduce the environmental impact of fashion consumption.

Conclusions. Fashion brands are highly interested in fast fashion trends and support such consumption patterns in their consumers. However, strong impact on the environment from textile and clothing industry has been already demonstrated by numerous researches, which contributes to the interest in alternative practices and opportunities for reduction. Environmental footprint labeling for clothes, legal obligation for organized management of discarded clothes, and consumer education, like promoting wearing clothes throughout its entire life expectancy, clothing libraries, upcycling and reuse, repairment and conscious buying strategy will all contribute to the reduction of impact on the environment and resources saving.

References

1. Munasinghe P., Druckman A., Dissanayake D. A systematic review of the life cycle inventory of clothing. *Journal of Cleaner Production*. 2021. № 320. 128852.
2. Yu Z., Yang Y. Carbon footprint of global cotton production. *Resources, Environment and Sustainability*. 2025. № 20. 100214.
3. Olivar Aponte N., Hernández Gómez J., Torres Argüelles V., Smith E. D. Fast fashion consumption and its environmental impact: a literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy*. 2024. № 20(1). 2381871.
4. Qian W., Ji X., Xu P., Wang L. Carbon footprint and water footprint assessment of virgin and recycled polyester textiles. *Textile Research Journal*. 2021. № 91(21-22). P. 2468-2475.
5. Lara L., Cabral I., Cunha J. Ecological approaches to textile dyeing: a review. *Sustainability*, 2022. № 14(14). 8353.
6. Li X., Zhu L., Ding X., Wu X., Wang L. Climate change and the textile industry: The carbon footprint of dyes. *AATCC Journal of Research*. 2024. № 11. P. 109-123.
7. Sarwar T., Khan S. Textile industry: pollution health risks and toxicity. *Textile Wastewater Treatment: Sustainable Bio-nano Materials and Macromolecules*. Singapore: Springer Nature Singapore. 2022. Vol. 1. P. 1-28.
8. Enes E., Kipöz Ş. The role of fabric usage for minimization of cut-and-sew waste within the apparel production line: Case of a summer dress. *Journal of Cleaner Production*. 2020. № 248. 119221.
9. Tang K. H. D. State of the art in textile waste management: a review. *Textiles*. 2023. № 3(4). P. 454-467.
10. Zhou Q., Le Q. V., Meng L., Yang H., Gu H., Yang Y., ... Peng, W. Environmental perspectives of textile waste, environmental pollution and recycling. *Environmental Technology Reviews*. 2022. № 11(1). P. 62-71.
11. Akbar S., Ahsan K. Investigation of the challenges of implementing social sustainability initiatives: a case study of the apparel industry. *Social Responsibility Journal*. 2021. № 17(3). P. 343-366.
12. Zhang D., Frei R., Wills G., Gerding E., Bayer S., Senyo P. K. Strategies and practices to reduce the ecological impact of product returns: An environmental sustainability framework for multichannel retail. *Business strategy and the environment*. 2023. № 32(7). P. 4636-4661.
13. Richards H. Rethinking value: 'radical transparency' in fashion. *Continuum*. 2021. № 35(6). P. 914-929.
14. Olivar Aponte N., Hernández Gómez J., Torres Argüelles V., Smith E. D. Fast fashion consumption and its environmental impact: a literature review. *Sustainability: Science, Practice and Policy*. 2024. № 20(1). 2381871.
15. Consumption of clothing, footwear, other textiles in the EU reaches new record high. European Environmental Agency. Press Release. Press release. Published 26 March, 2025. URL: <https://www.eea.europa.eu/en/newsroom/news/consumption-of-clothing-footwear-other-textiles-in-the-eu-reaches-new-record-high>
16. Schmutz M., Hischier R., Som C. Factors Allowing Users to Influence the Environmental Performance of Their T-Shirt. *Sustainability*. 2021. № 13(5). 2498.
17. Zhao M., Zhou Y., Meng J., Zheng H., Cai Y., Shan Y., ... Yang Z. Virtual carbon and water flows embodied in global fashion trade-a case study of denim products. *Journal of Cleaner Production*. 2021. № 303. 127080.
18. Zhou Y., Bao W., Yan F., Zhang Y., Wang L. Carbon Footprint and Water Footprint Assessment of Down Jackets. *AATCC Journal of Research*. 2023. № 10(5). P. 300-310.
19. Asmi F., Zhang Q., Anwar M. A., Linke K., Zaied Y. B. Ecological footprint of your denim jeans: production knowledge and green consumerism. *Sustainability Science*. 2022. № 17(5). P. 1781-1798.
20. Gonzalez V., Lou X., Chi T. Evaluating environmental impact of natural and synthetic fibers: a life cycle assessment approach. *Sustainability*, 2023. № 15(9). 7670.
21. Brenot A., Chuffart C., Coste-Manière I., Deroche M., Godat E., Lemoine L., Tornaire C. Water Footprint in Fashion and Luxury Industry. *Water in Textiles and Fashion*. 2019. P. 95-113.

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

МЕТЕОУМОВИ СЕРЕДОВИЩА ЯК СКЛАДОВА ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

Харченко В.В.

Національний університет харчових технологій
вул. Володимирська, 68, 01033, м. Київ
graf_geo_ua@yahoo.co.uk

Російська неспровокована повномасштабна війна проти України належить до найтяжчих злочинів – злочинів агресії. Терористичні способи ведення війни супроводжуються гострими екоцидними наслідками для довкілля України. Офіційно урядовими службами задокументовано понад 9 тисяч випадків шкоди і руйнувань, завданих окупантами довкіл्लю нашої держави в ході повномасштабного вторгнення. Збитки, заподіяні екосередовищу України російськими екоцидними військовими злочинами, нині перевищують 5,3 трлн грн., що в 4 рази перевершує доходи державного бюджету України за 2021 рік – до повномасштабного вторгнення. Екоцидним злочином із найбільшою одноразово заподіяною окупантами довкіл्लю нашої держави шкодою стало руйнування греблі Каховського водосховища 6 червня 2023 року. Орієнтовна сума збитків, завданих довкіл्लю таким злочином перевищує 77,8 млрд грн. Але розміри шкоди досі уточнюються. Водойма була важливою і для економіки, і являла собою природно-антропогенну екосистему. Дискусійним поміж експертів є питання щодо доцільності чи недоцільності відновлення Каховського водосховища після деокупації Півдня України. Важливим для розв'язання зазначеного питання є врахування метеоумов середовища розміщення означеної водойми – переважно південностепових екосистем України із посушливим кліматом. Аналіз метеорологічних даних показує, що значення випаровуваності на теренах розміщення Каховського водосховища можуть перевищувати 942 мм на рік. За таких умов із поверхні водойми щороку випаровувалося понад 2,03 км³ води. Близько половини такого обсягу компенсувалося опадами, а майже 0,99 км³ безповоротно втрачалося. Настільки великі втрати значно перевищують обсяги води, що використовується для потреб населення України і для невиробничої сфери держави. Відповідно майбутнє відновлення Каховського водосховища не виглядає раціональним і відповідним цілям сталого розвитку нашої держави, особливо за його оригінальними інженерними проектами. *Ключові слова:* Каховське водосховище, метеоумови, випаровуваність, екоцидні воєнні злочини.

Environmental meteorological conditions as a component of assessing the efficiency of the Kakhovka reservoir. Kharchenko V.

The Russian unprovoked full-scale war against Ukraine is one of the most serious crimes – crimes of aggression. Terrorist methods of waging war are accompanied by acute ecocidal consequences for the environment of Ukraine. Officially, government services have documented more than 9 thousand cases of damage and destruction caused by the occupiers to the environment of our state during the full-scale invasion. The damage caused to the ecological environment of Ukraine by Russian ecocidal war crimes currently exceeds UAH 5.3 trillion, which is 4 times higher than the revenues of the state budget of Ukraine for 2021 – before the full-scale invasion. The ecocidal crime with the greatest single damage caused by the occupiers to the environment of our state on June 6, 2023 was the destruction of the Kakhovka reservoir dam on June 6, 2023. The estimated amount of damage caused to the environment by such a crime exceeds UAH 77.8 billion. But the extent of the damage is still being clarified. The reservoir was important for the economy and was a natural and anthropogenic ecosystem. The question of the feasibility or inexpediency of restoring the Kakhovka reservoir after the deoccupation of Southern Ukraine is a matter of debate among experts. It is important to address this issue by taking into account the meteorological conditions of the location of the reservoir – mainly the southern steppe ecosystems of Ukraine with an arid climate. Analysis of meteorological data shows that the evaporation rate in the area where the Kakhovka reservoir is located can exceed 942 mm per year. Under such conditions, more than 2.03 km³ of water evaporated from the surface of the reservoir every year. About half of this volume was compensated by precipitation, and almost 0.99 km³ was irretrievably lost. Such large losses significantly exceed the volume of water used for the needs of the population of Ukraine and for the non-productive sphere of the state. Accordingly, the future restoration of the Kakhovka reservoir does not look rational and consistent with the goals of sustainable development of our state, especially according to its original engineering projects. *Key words:* Kakhovka reservoir, meteorological conditions, evaporation rate, ecocidal war crimes.

Постановка проблеми. Російська агресія має руйнівний вплив на нашу країну. Окупанти відповідалі не лише за людські жертви і матеріальну шкоду, а й за екосередовищне спустошення.

Росія вже вчинила незліченну кількість військових злочинів щодо деградації екосистем. Загальна кількість означених злочинів, що були задокументовані на кінець липня 2025 року, наближається до 9 200, а розмір завданих збитків становить 5,302 трлн грн. [1]. Це – у понад 4 рази більше за доходи Державного бюджету України у 2021 році (менше 1,3 трлн грн. [2]), коли економіка країни ще не була порушена повномасштабною війною.

Російським екоцидним злочином із найбільшою одноразово заподіяною шкодою для середовища є підризу дамби Каховського водосховища [3]. Окупанти захопили однойменну ГЕС у перший день повномасштабного вторгнення – 24 лютого 2022. Згодом вони станцію замінували і 6 червня 2023 підірвали [4]. Орієнтовна сума збитків, завданих довкіл्लю внаслідок підризу росією Каховської ГЕС, перевищує 77,8 млрд грн. [5]. Точні підрахунки збитків потребуватимуть додаткових досліджень, зокрема – після деокупації захоплених ворогом лівобережних територій.

Каховське водосховище являло собою величезну природно-антропогенну екосистему на теренах

українських степів. Вона існувала майже 70 років, взаємодіючи зі степовими ландшафтами. Питання щодо доцільності відновлення водосховища після деокупації Півдня України викликає в експертів багато дискусій.

Актуальність дослідження. Знищення штучної водойми, розміром із Каховське водосховище, шляхом підриву її дамби – справжній акт тероризму. Він супроводжувався значними людськими жертвами, руйнуванням житла та об'єктів критичної інфраструктури, затопленням величезних територій, у тому числі – з небезпечними об'єктами (звалищами, очисними спорудами, складами токсичних матеріалів тощо). Усе це має довготривалий негативний вплив на довкілля і здоров'я людей.

Втрата подібного водного об'єкту істотно позначається також на житті громад, які безпосередньо не постраждали від підриву дамби, але які залежали від водосховища як від джерела водних, енергетичних, рекреаційних та інших умов і ресурсів.

Після усунення основних наслідків катастрофи, спричиненої руйнівним знищенням Каховського водосховища, важливим постане питання щодо доцільності відновлення такого об'єкту після припинення бойових дій. Тому дослідження, спрямовані на різнобічне оцінювання ефективності означеної водойми, є актуальними.

Виклад основного матеріалу. Створення водосховищ зумовлене, в першу чергу, потребами в зменшенні локальних проявів нестачі водних ресурсів для водопостачання, зрошення тощо, зокрема – у таких вододефіцитних регіонах, якими є степові області України. Проте великим водосховищам притаманне комплексне використання: гідроенергетика, водний транспорт тощо [6].

Ефективне виконання великим водосховищем запроєктованих функцій можливе лише за наявності в ньому певних обсягів води. Але істотна проблема, що виникає після спорудження штучних водойм, – різке зростання випаровування води і, відповідно, зменшення річкового стоку. Особливо гострим є такий недолік у регіонах із посушливим кліматом – де опадів випадає менше, ніж могло б випаруватися. Посилює відповідну проблему велика площа водного дзеркала водойми за невеликих глибин.

Означені проблеми значною мірою були притаманні Каховському водосховищу. Воно споруджене у 1955–1958 рр.; простягалося з північного заходу на південний схід на 220 км. Площа становила 2 155 км², об'єм – 18,2 км³ (корисний – 6,8 км³ [7]); мало середню глибину 5 м, максимальну – 24 м. Ширина водосховища сягала від 3,5 до 25 км. Зона мілководдя займала менше десятої частини площі. Гарантовані габарити шляху суден: глибина – 3,65 м, ширина суднового ходу – 80–200 м. Коливання рівня води не перевищує 4 м, водообмін здійснювався 2–3 рази на рік [8].

Методичні складові оцінювання ефективності Каховського водосховища. Надходження води до

такої штучної водойми відбувається головним чином за рахунок річкового стоку й атмосферних опадів. Основні витрати води – на стік із водосховища і на випаровування вологи з його поверхні. Тож ефективність водокористування значною мірою зумовлена метеоумовами довкілля, у якому знаходиться водойма. Важливим показником щодо таких умов є випаровуваність.

Випаровуваність – це величина, яка показує, скільки води випарувалося б з одиниці площі відповідної території при необмежених запасах вологи. Така величина є оцінкою потенційних можливостей регіону щодо випаровування [9]. Вимірюється, подібно до опадів, як товщина шару води в міліметрах.

Дані щодо випаровуваності води із поверхні Каховського водосховища отримано *розрахунками* за поширеною в українській метеорології формулою М. М. Іванова [10]:

$$E = 0,0018 (t + 25)^2 (100 - f), \text{ мм},$$

де t – середня місячна температура повітря, f – середня місячна відносна вологість повітря за кожен місяць окремо.

Склавши разом результати за 12 місяців було отримано значення випаровуваності за рік.

Порівняння значень випаровуваності з поверхні водосховища й кількості опадів, яку воно засвоює, дає можливість *оцінити* вплив метеоумов довкілля на водний об'єкт. Розрахунки і порівняння щодо Каховського водосховища були здійснені із використанням даних метеорологічних спостережень для міста Нікополя.

Порівняння незворотних втрат води на випаровування з даними щодо водоспоживання в Україні дало змогу отримати певні *оцінки* щодо ефективності, яку мало Каховське водосховище до його терористичного знищення російськими агресорами влітку 2023 року.

Вплив метеоумов довкілля на водні ресурси Каховського водосховища. Означена водойма була створена на територіях із посушливим кліматом. Верхів'я Каховського водосховища знаходилися на південних теренах Північностепової підзони України. Далі воно простягалося через усю Південностепову підзону аж до сухого степу (рис. 1).

Найбільші площі водосховища зосереджувалися на схід і на захід від міста Нікополя. Тому, як уже було зазначено, для розрахунків були використані дані метеорологічних спостережень для означеного міста – за матеріалами Національного управління океанічних і атмосферних досліджень (NOAA, США). Період спостережень – 1991–2020 роки (табл. 1).

Використовуючи дані табл. 1, здійснюємо розрахунки випаровуваності за формулою М. М. Іванова. Результати по місяцях будуть такими.

$$1. E = 0,0018 \cdot (-2,4 + 25)^2 \cdot (100 - 85,2) = 13,6 \text{ мм}.$$

$$2. E = 0,0018 \cdot (-1,6 + 25)^2 \cdot (100 - 81,5) = 18,2 \text{ мм}.$$

$$3. E = 0,0018 \cdot (3,5 + 25)^2 \cdot (100 - 75,2) = 36,2 \text{ мм}.$$

$$4. E = 0,0018 \cdot (10,7 + 25)^2 \cdot (100 - 65,4) = 79,4 \text{ мм}.$$



Рис. 1. Геопросторове положення Каховського водосховища

Таблиця 1

Дані метеорологічних спостережень для м. Нікополя (1991–2020) [11]

Показник	Місяці												Рік
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Середня t повітря, $^{\circ}\text{C}$	-2,4	-1,6	3,5	10,7	17,0	21,2	23,5	22,8	16,9	10,3	4,0	-0,5	10,5
Відносна вологість повітря, %	85,2	81,5	75,2	65,4	63,6	63,5	60,6	58,3	66,4	75,7	83,7	86,0	72,1
Кількість опадів, мм	38	34	37	40	47	56	39	36	41	35	40	42	485

$$5. E = 0,0018 \cdot (17,0 + 25)^2 \cdot (100 - 63,6) = 115,6 \text{ мм.}$$

$$6. E = 0,0018 \cdot (21,2 + 25)^2 \cdot (100 - 63,5) = 140,2 \text{ мм.}$$

$$7. E = 0,0018 \cdot (23,5 + 25)^2 \cdot (100 - 60,6) = 166,8 \text{ мм.}$$

$$8. E = 0,0018 \cdot (22,8 + 25)^2 \cdot (100 - 58,3) = 171,5 \text{ мм.}$$

$$9. E = 0,0018 \cdot (16,9 + 25)^2 \cdot (100 - 66,4) = 106,2 \text{ мм.}$$

$$10. E = 0,0018 \cdot (10,3 + 25)^2 \cdot (100 - 75,7) = 54,5 \text{ мм.}$$

$$11. E = 0,0018 \cdot (4,0 + 25)^2 \cdot (100 - 83,7) = 24,7 \text{ мм.}$$

$$12. E = 0,0018 \cdot (-0,5 + 25)^2 \cdot (100 - 86,0) = 15,1 \text{ мм.}$$

Склавши отримані результати, одержуємо значення випаровуваності води за рік. Воно становить близько 942,1 мм.

Таким чином, із поверхні Каховського водосховища, площа якого становила 2 155 км², щороку випаровувалося більше 2,03 км³ води. Це – величезна кількість. Якби, наприклад, стільки вологи втрачав Південний Буг – одна з найбільших річок України, – то він обмілів би на 2/3.

Частина втраченого через випаровування стоку компенсувалася атмосферними опадами, що випадали над поверхнею водосховища. Якщо від показника випаровуваності відняти річну суму опадів, то отримаємо умовно безповоротні втрати води. Умовно – бо й означену компенсацію можна вважати дещо умовною. Адже опади, які випадають не на водну поверхню, а на суходіл, що є нині на

місці водосховища, у значній кількості поверхневим і підземним стоком потрапляють до Дніпра. І збільшують його стік. Особливо протягом 5 місяців – із листопада по березень (табл. 1), – коли кількість опадів перевищує випаровування. Хоча й у теплий період року більшість приток Дніпра не пересихають. До того ж, водні маси значно краще засвоюють сонячну радіацію і майже не прикриті рослинністю, як волога поверхня суходолу після опадів. Це зумовлює більшу випаровуваність із поверхні водойми.

Поверхня Дніпра теж втрачає певну кількість води через випаровування. Проте площі поверхні річки і Каховського водосховища настільки незіставні, що такі втрати води можна не враховувати в цьому дослідженні. Крім того, завдяки течії у річці поверхневі тепліші влітку шари води постійно перемішуються з холоднішими придонними, зменшуючи випаровування. У той же час малорухливі гарно прогріті водні маси водосховищ – особливо у прибережних і міліних зонах – випаровуються дуже інтенсивно.

Середня річна кількість опадів над поверхнею Каховського водосховища становила близько 485 мм (табл. 1). Тож випаровування перевищувало надходження води з опадами на 457,1 мм. А умовні безповоротні втрати води становили близько 0,99 км³.

Навіть таке число втрат води – надмірно велике.

Згідно з доступними нині даними Держстату України (до 2023 року включно) [12] на питні і санітарно-гігієнічні потреби населення у 2023 використано 767 млн м³ води. Ще 102 млн м³ – на інші невиробничі потреби країни. Разом – 869 млн м³, або менше 0,87 км³. Таким чином, Каховське водосховище втрачало через випаровування воду в обсягу на понад 120 млн м³ більшому, ніж потрібно для покриття нинішніх потреб держави, що не належать до виробничих.

2021 року – до повномасштабного вторгнення РФ – на потреби населення України було використано 1 019 млн м³ води (1,02 км³). Таке число теж цілком зіставне з означеними втратами на випаровування з Каховського водосховища. Тим більше, втрати в 0,99 км³ розраховані, як зазначалося, на основі метеоданих за 1991–2020 роки. Температура ж повітря з 1990-х до нині – а значить і випаровуваність – помітно зросла.

Одним з аргументів на користь неминучості майбутнього відновлення Каховського водосховища є необхідність задоволення потреб аграрного комплексу Півдня країни у водних ресурсах для зрошення. За 2023 рік із метою зрошення на всій підконтрольній державі території України використано 192 млн м³ води. Втрачених 0,99 км³ вистачило б на понад 5 років такого поливу сільгоспугідь. Навіть у 2021 році на зрошення витрачалася кількість води менша – 970 млн м³ [12], або 0,97 км³, – ніж означені втрати. Таке природокористування не можна вважати ефективним і відповідним цілям сталого роз-

витку України.

Висновки. Російська неспровокована війна проти України є злочином агресії з гострими екоцидними наслідками. Офіційно задокументовано більше 9 тисяч випадків шкоди і руйнувань, завданих окупантами екосистемам України під час повномасштабного вторгнення.

Збитки, заподіяні довікільлю нашої держави екоцидними військовими злочинами росії, нині в 4 рази більші, ніж доходи державного бюджету України до повномасштабного вторгнення. Російським злочином із найбільшою одноразово заподіяною довікільлю шкодою є підрив дамби Каховського водосховища – орієнтовна сума збитків перевищує 77,8 млрд грн.

Багато дискусій виникає в експертів щодо доцільності чи недоцільності відновлення водосховища після деокупації Півдня України. Врахування метеоумов середовища розміщення означеної водойми – переважно Південностепової підзони – показує, що з її поверхні випаровувалося понад 2 км³ води щороку. Близько половини такого обсягу компенсувалося опадами. А 0,99 км³ втрачалося безповоротно. Такі надмірні втрати істотно перевищують обсяги води, що використовується населенням України і невиробничою сферою. Тому майбутнє відновлення Каховського водосховища, в усякому випадку – в колишньому його проектному стані, виглядає нераціональним і невідповідним цілям сталого розвитку України рішенням.

Подяка. Автор вдячний Збройним Силам України за захист і можливість провести представлений аналіз.

Література

1. Наслідки воєнних дій та вплив на довкілля. *ЕкоЗагроза*. 2024. URL: <https://ecozagroza.gov.ua> (дата звернення 20.07.2025).
2. Виконання державного бюджету України. Мінфін. Індекси. 2021. URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/budget/%20gov/2021/> (дата звернення 22.07.2025)
3. Харченко В. В., Котинський А. В., Якименко І. Л. Цілеспрямоване злочинне знищення довкілля України як наслідок російської агресії. *Екологічні науки*. 2024. № 6 (57). – С. 116–120.
4. Оперативна інформація за наслідками підриву Каховської ГЕС станом на 06:00 13.06.2023. *ЕкоЗагроза*. 2023. URL: <https://ecozagroza.gov.ua> (дата звернення 23.07.2025).
5. Наслідки від підриву росією греблі Каховської ГЕС. *ЕкоЗагроза*. 2023. URL: <https://ecozagroza.gov.ua> (дата звернення 23.07.2025).
6. Хільчевський В. К. Стік зарегульований. Велика українська енциклопедія. URL: https://vue.gov.ua/Стік_зарегульований (дата звернення: 24.07.2025).
7. Яцик А. В., Томільцева А. І., Томільцев М. Г. та ін. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду / Київ: Генеза, 2003. – 176 с.
8. Мішина Л. Гідрографічне дослідження річки Дніпро: минуле, сучасне, майбутнє. *Вісник Держгідрографії*. 2006. № 1 (13). С. 9–14. URL: <https://hydro.gov.ua/dl/vdgg/vd013.009.pdf> (дата звернення: 25.07.2025)
9. Випаровування та випаровуваність. Географічний розподіл цих величин. *Geograf*. 2025. URL: <http://www.geograf.com.ua/meteorology/896-viparovuvannya-ta-viparovuvanist-geografichnij-rozpodil-tsikh-velichin> (дата звернення: 25.07.2025)
10. Проценко Г. Д. Метеорологія та кліматологія: Навчальний посібник. 2007. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/6469_01.pdf (дата звернення: 25.07.2025)
11. Nikopol, Ukraine. *En.Wikipedia*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Nikopol,_Ukraine (дата звернення: 25.07.2025)
12. Статистичний щорічник України за 2023 рік / Державна служба статистики України. Київ, 2024. 267 с. URL: https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2023/zb/11/year_23_u.pdf (дата звернення: 25.07.2025)

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЕВОЛЮЦІЙНІ ЗМІНИ МЕХАНІЗМІВ ДЕПОНУВАННЯ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У БОЛОТНИХ ЕКОСИСТЕМАХ В УМОВАХ ЗРОСТАЮЧОГО АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Вовк В.М., Хамдош І.Н.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

ke_miyu@ztu.edu.ua; gef_kgv@ztu.edu.ua; vovkvadim1983@gmail.com; 24d_khin@liceum.ztu.edu.ua

Дослідження спрямоване на комплексний аналіз еволюційних змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах під впливом зростаючого антропогенного навантаження та виявлення закономірностей адаптивної відповіді природних систем на техногенний тиск. Актуальність роботи обумовлена необхідністю розуміння трансформаційних процесів у водно-болотних угіддях в умовах посилення промислового впливу. Дослідження базується на комплексному аналізі еволюційних стадій болотних екосистем та трансформації механізмів депонування важких металів із застосуванням сучасних методів біогеохімічного аналізу, спектроскопії та математичного моделювання. Запропоновано концептуальну модель п'яти ключових аспектів: стадії розвитку болотних систем від природного стану до техногенно модифікованого, механізми акумуляції металів у донних відкладах та їх зміна під антропогенним впливом, біогеохімічні цикли у сапропелі та формування нових сполук, молекулярні механізми взаємодії металів з гуміновими кислотами та їх еволюція, кінетика вивільнення металів та зміна їх мобільності. Виявлено значні еволюційні зміни в механізмах депонування важких металів під впливом антропогенного навантаження. Встановлено трансформацію сорбційних процесів від фізичної адсорбції до хемосорбційних механізмів із залученням органо-мінеральних комплексів, еволюцію біологічних систем депонування через адаптацію мікробних спільнот, формування техногенно модифікованого сапропелю з підвищеною ємністю депонування та зміненою структурою. Результати дослідження мають важливе практичне значення для розробки стратегій збереження водно-болотних угідь, прогнозування поведінки болотних екосистем при різних сценаріях антропогенного впливу, створення ефективних систем екологічного моніторингу та управління якістю водних ресурсів в умовах зростаючого техногенного тиску на природні екосистеми. *Ключові слова:* болотні екосистеми, важкі метали, механізми депонування, антропогенне навантаження, еволюційні зміни, сапропель, біогеохімічні цикли.

Evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms in wetland ecosystems under increasing anthropogenic pressure. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Vovk V., Khamdosh I.

The research aims to comprehensively analyze evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms in wetland ecosystems under increasing anthropogenic pressure and identify patterns of adaptive response of natural systems to technogenic stress. The relevance of this work is determined by the necessity to understand transformational processes in wetlands under enhanced industrial impact. The study is based on comprehensive analysis of evolutionary stages of wetland ecosystems and transformation of heavy metal deposition mechanisms using modern methods of biogeochemical analysis, spectroscopy, and mathematical modeling. A conceptual model of five key aspects is proposed: wetland system development stages from natural state to technogenically modified conditions, metal accumulation mechanisms in bottom sediments and their changes under anthropogenic influence, biogeochemical cycles in sapropel and formation of new compounds, molecular mechanisms of metal interaction with humic acids and their evolution, and metal release kinetics with changes in their mobility. Significant evolutionary changes in heavy metal deposition mechanisms under anthropogenic pressure were revealed. Transformation of sorption processes from physical adsorption to chemisorption mechanisms involving organo-mineral complexes, evolution of biological deposition systems through microbial community adaptation, and formation of technogenically modified sapropel with enhanced deposition capacity and altered structure were established. The research results have important practical significance for developing wetland conservation strategies, predicting wetland ecosystem behavior under different scenarios of anthropogenic impact, creating effective ecological monitoring systems, and managing water resource quality under increasing technogenic pressure on natural ecosystems. The findings contribute to understanding ecosystem resilience and adaptation mechanisms, providing scientific basis for environmental management decisions in industrialized regions. *Key words:* wetland ecosystems, heavy metals, deposition mechanisms, anthropogenic pressure, evolutionary changes, sapropel, biogeochemical cycles.

Вступ. Болотні екосистеми відіграють критично важливу роль у глобальних біогеохімічних циклах та є одними з найбільш ефективних природних систем депонування важких металів, що сформувалися в процесі тривалої еволюції гідросфери та біосфери Землі. Прибережні водно-болотні угіддя зазвичай розташовані між наземними та морськими екосистемами і часто діють як природні фільтри для видалення хімічних речовин та забруднювачів з поверх-

невого стоку або річкової води [1]. У сучасну епоху антропогену зростаючий техногенний тиск призводить до кардинальних змін еволюційно сформованих процесів депонування, порушуючи природні геохімічні бар'єри та створюючи нові умови для міграції та акумуляції важких металів. Антропогенне навантаження характеризується не лише кількісним зростанням концентрацій металів-забруднювачів, але й якісними змінами в спектрі забруднювачів, вклю-

чаючи появу нових синтетичних сполук та наночасинок металів [2].

Теоретичні та прикладні аспекти геохімії важких металів у болотних екосистемах розглядаються в роботах багатьох вітчизняних та зарубіжних вчених. Зокрема, питання біогеохімічних циклів важких металів у прибережних водно-болотних угіддях висвітлені в працях, що підкреслюють долю важких металів, зв'язаних у відкладах або вивільнених у систему через седименти [3]. Механізми акумуляції та трансформації важких металів у донних відкладах боліт досліджені у роботах, що показують значний вплив антропогенної діяльності на ці процеси [4, 5]. Особлива увага приділяється взаємодії важких металів з органічною речовиною, зокрема з гуміновими кислотами, що визначає стабільність металоорганічних комплексів [6]. Екологічні наслідки забруднення важкими металами водно-болотних угідь та їх вплив на біорізноманіття досліджують науковці, які вказують на канцерогенні ризики для екосистем та людини [7, 8]. Кінетика вивільнення важких металів з донних відкладів в умовах зміни екологічних факторів розглянута в дослідженнях, що показують складність багатофазних процесів ремобілізації [9, 10]. Систематичні огляди глобальних тенденцій забруднення важкими металами прибережних водно-болотних угідь за останні три десятиліття виявляють швидке зростання антропогенних джерел забруднення [11]. Молекулярні механізми взаємодії важких металів з біогеохімічними циклами сірки у прибережних болотах є предметом інтенсивних досліджень [12].

Дослідження вітчизняних науковців також вносять значний вклад у розуміння процесів акумуляції важких металів в урбанізованих гідроекосистемах. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В. та співавтори досліджують просторову диференціацію та міграційні закономірності поліелементного розподілу важких металів в компонентах урбанізованих гідроекосистем [1]. Питання сталого використання природних ресурсів України в контексті інноваційних підходів розглядають Капеліста І., Кірейцева Г.В. та інші [2]. Фізіологічні та біохімічні біомаркери стійкості макрофітів до токсичних стресорів військового походження вивчають у працях, що показують адаптивні можливості водної рослинності [3]. Динаміка розподілу сполук важких металів в урбогідротопах Київської області в пост-військових умовах є предметом досліджень, що виявляють особливості техногенного впливу [4]. Оцінка стану та фіторе mediaційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроекосистем Малинщини проведена в роботах, що демонструють можливості природного відновлення [5]. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем досліджений на прикладі с. Мощун Київської області [6].

Ці дослідження надають методологічну основу та практичні інструменти для розуміння еволюцій-

них змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах. Вони допомагають систематично підходити до оцінки впливу антропогенного навантаження на природні геохімічні процеси, ідентифікувати ключові механізми адаптації екосистем та розробляти ефективні стратегії для їх збереження в умовах зростаючого техногенного тиску.

Незважаючи на значний обсяг наукових досліджень, присвячених геохімії важких металів у водно-болотних угіддях, недостатньо вивченими залишаються питання еволюційних змін механізмів депонування в умовах інтенсифікації антропогенного навантаження. Особливої уваги потребує розробка концептуальних моделей адаптивної відповіді болотних екосистем на техногенний вплив, дослідження критичних порогів стабільності систем депонування та прогнозування їх поведінки в умовах глобальних змін. Ці питання набувають особливої актуальності в контексті необхідності збереження екосистемних послуг болотних угідь та розробки стратегій сталого управління водними ресурсами.

Метою дослідження є аналіз еволюційних змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах під впливом зростаючого антропогенного навантаження та виявлення закономірностей адаптивної відповіді природних систем на техногенний тиск.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

1. проаналізувати еволюційні стадії болотних екосистем та трансформацію механізмів депонування важких металів під впливом антропогенного навантаження;
2. дослідити зміни в механізмах акумуляції важких металів у донних відкладах та формування техногенно модифікованого сапропелю;
3. вивчити еволюційні зміни біогеохімічних циклів важких металів у сапропелі болотних екосистем;
4. проаналізувати еволюцію молекулярних механізмів взаємодії важких металів з гуміновими кислотами в умовах антропогенного тиску;
5. дослідити еволюційні зміни кінетики вивільнення важких металів з донних відкладів під впливом антропогенних факторів;
6. оцінити адаптивну здатність болотних екосистем та визначити критичні пороги стабільності систем депонування.

Реалізація поставлених завдань дозволить сформувати науково обґрунтовані уявлення про еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах, які можуть бути використані для розробки стратегій збереження водно-болотних угідь, прогнозування їх поведінки в умовах глобальних змін та створення ефективних систем екологічного моніторингу.

Основна частина. Сучасні дослідження геохімії болотних екосистем свідчать про необхідність

перегляду традиційних уявлень про механізми депонування важких металів з урахуванням динамічної природи еволюційних процесів та їх відповіді на антропогенний вплив. Особливої уваги потребує вивчення формування сапропелевих відкладів як основних депозитаріїв важких металів, кінетики їх вивільнення в умовах зміни екологічних факторів та ролі молекулярних механізмів взаємодії металів з органічними лігандами в забезпеченні довгострокової стабільності систем депонування.

Болотні екосистеми протягом своєї еволюції розвинули складні механізми депонування важких металів, які забезпечували ефективне очищення природних вод та довгострокове утримання забруднювачів у донних відкладах. Однак зростаючий антропогенний тиск призводить до кардинальних змін цих еволюційно сформованих процесів, порушуючи природні геохімічні бар'єри та створюючи нові умови для акумуляції металів. Еволюційні зміни механізмів депонування відбуваються на всіх стадіях розвитку болотних систем, від початкових водних об'єктів до зрілих торфових болот.

На стадії відкритої річки природні механізми депонування базувалися на фізичній седиментації та первинній сорбції на мінеральних частинках. Антропогенне навантаження призвело до еволюційної адаптації цих процесів через розвиток нових сорбційних центрів та зміну селективності депонування. Стадія заростання річки характеризується еволюцією біологічних механізмів депонування, включаючи розвиток спеціалізованих мікробіальних угруповань та адаптивних змін у водній рослинності. Формування болота супроводжується еволюцією найбільш складних механізмів депонування, включаючи утворення специфічних органо-мінеральних комплексів та розвиток анаеробних процесів іммобілізації металів. Ці еволюційні зміни відображають адаптивну відповідь екосистем на зростаючий

антропогенний тиск, але також можуть призводити до порушення природного балансу та створення ризиків екологічних катастроф.

Еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах відображають адаптивну відповідь природних систем на зростаючий антропогенний тиск. Традиційні механізми сорбції еволюціонували від простої фізичної адсорбції до складних хемосорбційних процесів з розвитком специфічних центрів зв'язування для різних груп металів. Ця еволюція включає формування нових мінеральних фаз та модифікацію поверхневих властивостей природних сорбентів.

Механізми осадження зазнали еволюційних змін від простого гідролітичного осадження до складних процесів співосадження та формування змішаних гідроксидно-сульфідних фаз. Еволюція комплексоутворення з органічними лігандами характеризується розвитком більш специфічних та стабільних металоорганічних комплексів, здатних ефективно депонувати метали навіть при високих концентраціях. Біоаккумуляція мікроорганізмами еволюціонувала від пасивного поглинання до активних процесів детоксикації з розвитком специфічних ферментних систем. Ці еволюційні зміни призвели до формування нового типу донних відкладів – техногенно модифікованого сапропелю, який характеризується підвищеною ємністю депонування та зміненими фізико-хімічними властивостями. Однак ці адаптивні зміни мають свої межі, і перевищення критичних навантажень може призвести до колапсу систем депонування.

Біогеохімічні цикли важких металів у болотних екосистемах зазнали значних еволюційних змін під впливом зростаючого антропогенного навантаження. Водно-донна межа еволюціонувала від простої дифузійної зони до складного біогеохімічного бар'єру з множинними окисно-відновними мікрозо-



Рис. 1. Еволюційні стадії болотних екосистем

Джерело: розроблено автором



Рис. 2. Еволюція механізмів акумуляції важких металів у донних відкладах під впливом зростаючого антропогенного навантаження

Джерело: розроблено автором



Рис. 3. Еволюційні зміни біогеохімічних циклів важких металів у сапропелі болотних екосистем

Джерело: розроблено автором

нами, що забезпечують селективне депонування різних груп металів.

Еволюція біологічного поглинання характеризується розвитком адаптивних механізмів у водних рослин та мікроорганізмів, включаючи синтез специфічних металозв'язуючих білків та розвиток толерантності до високих концентрацій металів. Процеси біомінералізації та детоксикації еволюціонували від простих механізмів ізоляції до складних процесів трансформації металів у нетоксичні форми. Сапропель як центральний компонент системи депонування зазнав еволюційних змін у своїй структурі та функціях, розвинувши підвищену смістість та селективність депонування. Еволюція процесів розкладання та мінералізації характеризується розвитком нових метаболічних шляхів, адаптованих до високих концентрацій металів. Механізми іммобілізації та депонування еволюціонували в напрямку створення більш стабільних форм зв'язування металів. Ключові процеси метилування, сульфатредукції та хелатоутворення зазнали адаптивних змін, що дозволяє екосистемам функціонувати в умовах підвищеного металевого навантаження, але ці зміни можуть мати непередбачувані довгострокові наслідки.

Молекулярні механізми взаємодії важких металів з гуміновими кислотами зазнали значних еволюційних змін під впливом зростаючого антропогенного навантаження. Ці зміни відображають адаптивну відповідь органічної матриці болотних відкладів на нові геохімічні умови та підвищені концентрації

металів-забруднювачів.

Еволюція гумінових кислот характеризується збільшенням кількості та різноманітності функціональних груп, здатних до селективного зв'язування різних металів. Ароматичні кільця та аліфатичні ланцюги зазнали структурних модифікацій, що підвищило їх афінність до специфічних груп металів. Карбоксильні групи ($-\text{COO}^-$) еволюціонували в напрямку підвищення селективності до двовалентних катіонів, а фенольні групи ($-\text{O}^-$) розвинули здатність до утворення більш стабільних комплексів. Центральний іон металу (M^{2+}) в еволюційно модифікованих системах характеризується більш різноманітними координаційними можливостями. Еволюція типів зв'язування включає розвиток нових форм мононодентатного (M-L), біодентатного (M-L₂) та полімерного (M-L-M) зв'язування з підвищеною стабільністю. Константи стабільності комплексів еволюціонували в напрямку збільшення: Cu^{2+} (до 6,8), Pb^{2+} (до 5,9), Cd^{2+} (до 4,8), що відображає адаптивні зміни органічної матриці. Ці еволюційні зміни забезпечують більш ефективне депонування металів, але можуть призводити до непередбачуваних змін у мобільності та біодоступності забруднювачів.

Кінетика вивільнення важких металів з донних відкладів болотних екосистем зазнала значних еволюційних змін під впливом зростаючого антропогенного навантаження. Ці зміни відображають адаптивну відповідь систем депонування на нові умови та створення більш стабільних форм утримання



Рис. 4. Еволюція молекулярних механізмів взаємодії важких металів із гуміновими кислотами

Джерело: розроблено автором

металів, але водночас можуть призводити до накопичення критичних навантажень.

Еволюція швидкої фази вивільнення характеризується розвитком більш селективних механізмів десорбції, що дозволяє утримувати найбільш токсичні метали при одночасному вивільненні менш небезпечних сполук. Повільна фаза еволюціонувала в напрямку формування більш стабільних внутрішньопорових комплексів та розвитку дифузійних бар'єрів. Дуже повільна фаза характеризується еволюцією надстабільних органо-мінеральних комплексів, здатних утримувати метали протягом геологічних періодів часу. Еволюційні зміни кінетичних параметрів включають зниження констант швидкості для критично важливих металів та підвищення селективності процесів вивільнення. Кінетика першого порядку модифікувалася з розвитком багатокомпонентних систем з різними константами швидкості для різних груп металів. Еловича модель та внутрішня дифузія зазнали еволюційних змін через розвиток нових типів активних центрів та модифікацію структури пор. Контролюючі фактори еволюціонували в напрямку створення більш стабільних систем, менш чутливих до зовнішніх впливів, включаючи буферування рН, термостабілізацію та розвиток резистентності до конкуруючих лігандів. Ці еволюційні зміни створюють більш надійні системи депонування, але можуть призводити до накопичення «екологічного боргу» у вигляді великих запасів депонованих металів.



Рис. 5. Еволюційні зміни кінетики вивільнення важких металів із донних відкладів

Джерело: розроблено автором

Еволюційні зміни механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах демонструють видатну адаптивну здатність природних систем до зростаючого антропогенного навантаження. Однак ці адаптації мають свої межі, і подальше зростання антропогенного тиску може призвести до порушення еволюційно сформованих механізмів депонування та катастрофічного вивільнення накопичених забруднювачів. Розуміння цих еволюційних процесів є критично важливим для прогнозування поведінки болотних екосистем в умовах глобальних змін та розробки стратегій їх збереження і відновлення. Подальші дослідження повинні зосередитися на встановленні критичних порогів антропогенного навантаження, за якими відбувається незворотна деградація систем депонування, та розробці інноваційних підходів до біоремедіації техногенно забруднених болотних екосистем.

Висновки. Проведене дослідження еволюційних змін механізмів депонування важких металів у болотних екосистемах в умовах зростаючого антропогенного навантаження дозволило встановити закономірності адаптивної відповіді природних систем на техногенний тиск та виявити ключові трансформації геохімічних процесів у водно-болотних угіддях. Аналіз еволюційних стадій болотних екосистем показав, що антропогенне навантаження призводить до кардинальних змін природних механізмів депонування на всіх етапах розвитку болотних систем – від відкритих водних об'єктів до зрілих торфових болот. Встановлено, що еволюційні зміни характеризуються трансформацією традиційних сорбційних процесів від простої фізичної адсорбції

до складних хемосорбційних механізмів з розвитком специфічних центрів зв'язування для різних груп металів.

Дослідження механізмів акумуляції важких металів у донних відкладах виявило формування принципово нового типу седиментів – техногенно модифікованого сапропелю, який характеризується підвищеною ємністю депонування та зміненими фізико-хімічними властивостями. Еволюція біологічних систем депонування супроводжується розвитком спеціалізованих мікробіальних угруповань та адаптивних змін у водній рослинності, що дозволяє екосистемам функціонувати в умовах підвищеного металевого навантаження. Однак виявлено, що ці адаптивні зміни мають свої межі, і перевищення критичних навантажень може призвести до колапсу систем депонування та катастрофічного вивільнення накопичених забруднювачів.

Аналіз біогеохімічних циклів важких металів у сапропелі показав еволюцію водно-донної межі від простої дифузійної зони до складного біогеохімічного бар'єру з множинними окисно-відновними мікрозонами, що забезпечують селективне депонування різних груп металів. Встановлено еволюційні зміни процесів біомінералізації, детоксикації, іммобілізації та депонування, які характеризуються розвитком нових метаболічних шляхів та створенням більш стабільних форм зв'язування металів. Ключові процеси метилювання, сульфатредукції та хелатоутворення зазнали адаптивних змін, що може мати непередбачувані довгострокові наслідки для функціонування екосистем.

Дослідження молекулярних механізмів взаємодії важких металів з гуміновими кислотами виявило значні еволюційні зміни в структурі та функціональних властивостях органічної матриці болотних відкладів. Встановлено збільшення кіль-

кості та різноманітності функціональних груп, здатних до селективного зв'язування різних металів, а також еволюцію констант стабільності комплексів у напрямку підвищення ефективності депонування. Розвиток нових форм координаційного зв'язування забезпечує більш стабільне утримання металів, але може призводити до непередбачуваних змін у їх мобільності та біодоступності.

Аналіз кінетики вивільнення важких металів з донних відкладів показав еволюцію багатофазних процесів ремобілізації з модифікованими константами швидкості та підвищеною селективністю. Еволюційні зміни кінетичних параметрів включають розвиток більш стабільних систем депонування, менш чутливих до зовнішніх впливів, що створює більш надійні геохімічні бар'єри, але може призводити до накопичення «екологічного боргу» у вигляді великих запасів депонованих металів.

Результати дослідження демонструють видатну адаптивну здатність болотних екосистем до зростаючого антропогенного навантаження, однак виявлені еволюційні зміни мають критичні межі стабільності. Подальше зростання антропогенного тиску може призвести до порушення еволюційно сформованих механізмів депонування та катастрофічного вивільнення накопичених забруднювачів. Розуміння цих еволюційних процесів є критично важливим для прогнозування поведінки болотних екосистем в умовах глобальних змін, розробки стратегій збереження водно-болотних угідь та створення ефективних систем екологічного моніторингу. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для розробки інноваційних підходів до біоремедіації техногенно забруднених болотних екосистем та управління якістю водних ресурсів в умовах зростаючого антропогенного тиску.

Література

1. Tsyhanenko-Dziubenko, I., Kireitseva, H., Shomko, O., Gandziura, V., Khamdosh, I. (2025). Analytical assessment of heavy metals polyelement distribution in urbanized hydroecosystem components: spatial differentiation and migration patterns. *Journal Environmental Problems*, 10(2), 135–144. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2025.02.135>
2. 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. s378-s395. DOI: 10.33002/nr2581.6853.0703ukr19
3. Bai, J., Huang, L., Gao, H., Zhang, G. Sulfur mediated heavy metal biogeochemical cycles in coastal wetlands: From sediments, rhizosphere to vegetation. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2022. Vol. 16, Issue 3. Article 1523. DOI: 10.1007/s11783-022-1523-x
4. Gao, W., Du, Y., Gao, S., Ingels, J., Wang, D. Heavy metal accumulation reflecting natural sedimentary processes and anthropogenic activities in two contrasting coastal wetland ecosystems, eastern China. *Journal of Soils and Sediments*. 2016. Vol. 16, Issue 3. P. 1093–1108. DOI: 10.1007/s00374-015-1089-3
5. Lu, S., Wang, H., Yao, Z. Heavy metals uptake and translocation of typical wetland plants and their ecological effects on the coastal soil of a contaminated bay in Northeast China. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 803. Article 149469. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149469
6. Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B.B., Beeregowda, K.N. Molecular mechanisms with heavy metals and humic acids interaction under anthropogenic pressure. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. Vol. 7, Issue 2. P. 60–72. DOI: 10.2478/intox-2014-0009
7. Zhang, Y., Dai, M., Yuan, Z., Methods, G., Zhang, C. Assessment of environmental and carcinogenic health hazards from heavy metal contamination in sediments of wetlands. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 17349. DOI: 10.1038/s41598-023-43349-7

8. Ali, M.M., Ali, M.L., Islam, M.S., Rahman, M.Z. Heavy Metal Pollution in Coastal Environments: Ecological Implications and Management Strategies: A Review. *Sustainability*. 2025. Vol. 17, Issue 2. Article 701. DOI: 10.3390/su17020701
9. Kong, X., Liu, T., Yu, Z., Chen, Z., Lei, D., Wang, Z., Zhang, H., Li, Q., Zhang, J. Heavy metal pollution in coastal wetlands: A systematic review of studies globally over the past three decades. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 424, Part C. Article 127312. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127312
10. Liu, J., Dong, Y., Xu, H., Wang, D., Xu, J. High concentrations of bioavailable heavy metals impact freshwater sediment microbial communities. *Annals of Microbiology*. 2016. Vol. 66. P. 1003–1012. DOI: 10.1007/s13213-015-1189-8
11. Chen, B., Stein, A.F., Maldonado, P.G., Sanchez de la Campa, A.M., Gonzalez-Castanedo, Y., Castell, N., de la Rosa, J.D. A global perspective on the nature and fate of heavy metals polluting water ecosystems, and their impact and remediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2024. Vol. 54, Issue 8. P. 580–612. DOI: 10.1080/10643389.2024.2317112
12. Liu, X., Wang, Y., Liu, Y., Chen, X., Yang, P., Feng, J., Ma, L.Q. Restoration of cadmium-contaminated paddy soils through Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) plantation. *Environmental Pollution*. 2019. Vol. 255, Part 1. Article 113–157. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113157
13. 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, № 4. P. 227–234. DOI: <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.227>
14. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Demchuk L. Dynamics of Heavy Metal Compounds Allocation in Urbohydrotops of Kyiv Region in Post-Military Conditions. 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2023. Vol. 2023, No. 1. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520066>
15. Tsyhanenko-Dziubenko I., Kireitseva H., Ventsel N., Ventsel V., Shevchuk L., Skyba G. Remote Evaluation of Post-Military Basin Moshchunka of Kyiv Oblast, Ukraine using Spectral Indices. 18th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. 2025. Vol. 2025. P.P. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2025510210>
16. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Кірейцева Г.В., Демчук Л.І., Скиба Г.В., Вовк В.М. Оцінка стану та фіторемедіаційного потенціалу антропогенно трансформованих гідроекосистем Малинщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 5 (50). С. 81-87.
17. Циганенко-Дзюбенко І.Ю., Гандзюра В.П., Алпатова О.М., Демчук Л.І., Хом'як І.В., Вовк В.М. Гідрохімічний статус пост-мілітарних водних екосистем с. Мощун, Київської області. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 1 (46). С. 53-58.
18. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І. Антропогенні детермінанти деградації гідрохімічних показників водних об'єктів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Том 349, № 2. С. 540-548. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-349-80>
19. Кірейцева Г., Циганенко-Дзюбенко І., Замула І., Демчук Л. Аналіз стану та моніторинг поверхневих водних об'єктів Чернігівської області. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, 2024, Випуск 1(144), С. 84-91. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.1.11>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

УДК 550.4

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКОЛОГО-ГЕОХІМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ В РАЙОНІ РОЗТАШУВАННЯ ПІСКОВИХ МАЙДАНЧИКІВ БОРТНИЦЬКОЇ СТАНЦІЇ АЕРАЦІЇ

Бойко О.В.¹, Лук'янова В.В.^{1,2}, Дерман В.А.¹, Туцький Д.Г.¹, Сорочинська О.Л.²
¹ДУ «Інститут геохімії навколишнього середовища» Національної академії наук України
пр. Академіка Палладіна, 34А, 03142, м. Київ
²Державний університет інфраструктури та технологій
вул. Кирилівська, 9, 04071, м. Київ
igns@ukr.net, ellena06.84@ukr.net

Вплив антропогенного забруднення на ґрунтовий покрив є досить високим за сучасних умов розвитку людства. Особливу увагу займає проблема забруднення ґрунтового покриву важкими металами на територіях прилеглих до промислових підприємств, очисних споруд, автомагістралей та територій, що зазнали впливу військових дій.

Бортницька станція аерації у м.Києві є важливим стратегічним об'єктом, який забезпечує очистку стічних вод мегаполіса. Технічний стан піскових майданчиків, необхідність у збільшенні проектної потужності функціонування очисних споруд, недостатня площа для складування вловленого піску, а також відсутність в вітчизняних реаліях способів його безпечної утилізації, призводить до забруднення ґрунтового покриву важкими металами не лише території Бортницької станції аерації, але й прилеглої до неї місцевості. Це призводить до неконтрольованого забруднення металами ґрунтів прилеглих територій, наземних та підземних водних об'єктів.

В роботі проведено еколого-геохімічний моніторинг ґрунтів території, що прилягає до майданчику уловлювачів та складування піску Бортницької станції аерації. Отримані дані свідчать, що формування ґрунтового покриву в його межах відбувається, загалом, на техногенних відкладах і лише з південного боку від уловлювачів піску спостерігаються поверхневі відклади з вираженим гумусовим шаром, тим самим морфологічно відповідають ґрунтовому покриву.

Отримані результати геохімічного аналізу ґрунтів із врахуванням аналізу геохімічних формул, дають змогу дійти висновку, що показник забруднення за провідними елементами забруднення (Ag, Hg, Sn, Cu, Cd, Pb) у 2023-му та 2024-му роках практично ідентичний. Спостерігається незначне зменшення концентрацій. Вірогідно, ідентичність елементів забруднення в досліджуваних пробах свідчить про їх генетичний зв'язок, що і є, в свою чергу, чітким аргументом впливу відходів на прилеглу територію. Здійснено порівняльний аналіз санітарно-гігієнічної оцінки динаміки забруднення ґрунтів важкими металами за попередні «моніторингові» роки (2019-2024 р.). Аналіз показав, що за геохімічними показниками моніторингових досліджень спостерігається незначне покращення екологічної ситуації на територіях, які є прилеглими до піскових майданчиків БСА (порівняно з попередніми роками). *Ключові слова:* геохімія, забруднення ґрунтів важкими металами, ремедіація ґрунтів, еколого-геохімічний моніторинг, Бортницька станція аерації.

Results of ecological and geochemical monitoring of soil contamination with heavy metals in the area of sand sites of bortnychi aeration station. Boiko O., Lukianova V., Derman V., Tutskyi D., Sorochynska O.

The impact of anthropogenic pollution on the soil cover is quite high under the current conditions of human development. Of particular concern is the problem of heavy metal contamination of soil cover in areas adjacent to industrial enterprises, wastewater treatment plants, highways and areas affected by military operations.

The Bortnytsia Aeration Station in Kyiv is an important strategic facility that provides wastewater treatment for the metropolis. The technical condition of the sand areas, the need to increase the design capacity of the treatment facilities, insufficient area for storing captured sand, and the lack of safe disposal methods in the domestic realities lead to heavy metal contamination of the soil cover not only on the territory of the Bortnychi Aeration Station but also in the surrounding area. This leads to uncontrolled metal contamination of the soil of adjacent territories, surface and underground water bodies.

The study conducted ecological and geochemical monitoring of the soils of the territory adjacent to the site of sand traps and storage of the Bortnytsia Aeration Station. The data obtained indicate that the formation of the soil cover within its boundaries is generally based on anthropogenic sediments, and only to the south of the sand traps are surface sediments with a pronounced humus layer, thus morphologically corresponding to the soil cover.

The results of the geochemical analysis of soils, taking into account the analysis of geochemical formulas, allow us to conclude that the pollution indicator for the leading pollutants (Ag, Hg, Sn, Cu, Cd, Pb) in 2023 and 2024 is almost identical. There is a slight decrease in concentrations. It is likely that the identity of the pollution elements in the samples under study indicates their genetic link, which is, in turn, a clear argument for the impact of waste on the surrounding area.

A comparative analysis of the sanitary and hygienic assessment of the dynamics of soil contamination with heavy metals for the previous "monitoring" years (2019-2024) was carried out. The analysis showed that, according to the geochemical indicators of the monitoring studies, there is a slight improvement in the environmental situation in the areas adjacent to the BSA sand sites (compared to previous years). *Key words:* geochemistry, soil pollution with heavy metals, soil remediation, ecological and geochemical monitoring, Bortnychi aeration station.

Постановка проблеми. Бортницька станція аерації (БСА) – складний комплекс інженерних споруд, обладнання та комунікацій, призначений для повної біологічної очистки стічних вод. Будівництво станції проводилось по мірі розвитку та розбудови території Київської агломерації ще з 60-х років ХХ століття. Проектна потужність станції становить 1,8 млн.м³ на добу. Проте, на сьогоднішній день, фактична витрата стічних вод, що надходять на очистку перевищує проектно закладені потужності, що передусім пов'язано з стрімкою урбанізацією території міста Києва та прилеглих до нього населених пунктів.

Важливими спорудами в забезпеченні функціонування станції аерації є піскові майданчики, які призначені для зневоднення піску, що затримується в пісכולках. Пісок із піскових майданчиків двічі на рік завантажується на автотранспорт і вивозиться на майданчик складування піску для його подальшої передачі на утилізацію. Безпосередньо піскові майданчики та місця складування піску є потенційним джерелом забруднення прилеглих до них територій, оскільки осад, що потрапляє до майданчиків, з високою імовірністю може містити в своєму складі забруднюючі речовини, зокрема важкі метали. Це призводить до неконтрольованого забруднення ґрунтів, наземних та підземних водних об'єктів [1-2].

Враховуючи вищевикладене, виникає необхідність в проведенні детального еколого-геохімічного моніторингу забруднення ґрунтів важкими металами прилеглих, до піскових майданчиків, територій з метою якнайшвидшого усунення наслідків та мінімізації шкоди навколишньому середовищу та населенню.

Актуальність дослідження. Ґрунт є кінцевим накопичувачем практично всіх шкідливих речовин, які потрапляють у нього не лише через забруднення повітря та гідросфери, а й через недбалу хазяйські діяльність людини [3-5]. Тому актуальним постає питання вивчення геохімічних характеристик ґрунту, на який подіяла антропогенна діяльність людини.

Технічний стан піскових майданчиків, необхідність у збільшенні проектної потужності функціонування очисних споруд, недостатня площа для складування вловленого піску, а також відсутність в вітчизняних реаліях способів його безпечної утилізації, призводить до забруднення ґрунтового покриву важкими металами не лише території БСА, але й прилеглої до неї місцевості.

Визначення пріоритетних задач при обстеженні забруднених територій, а також оптимальних підходів для мінімізації негативного впливу на ґрунти і розробка організаційно-технічних методів їх ремедіації є доволі актуальним питанням, оскільки вже в найближчому майбутньому дана проблема може стати справжнім викликом для екологічного стану Київської агломерації.

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

даної статті є узагальнення результатів проведених моніторингових еколого-геохімічних дослідження на предмет забруднення важкими металами ґрунтів території, що прилягає до майданчику уловлювачів та складування піску БСА. В майбутньому, результати робіт допоможуть не тільки оцінити актуальний стан забруднення ґрунту в межах майданчиків вловлювання та складування піску, але й розробити методологічні та організаційно-технічні заходи, які дозволять мінімізувати можливий негативний вплив на прилеглі до них території.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день, досвід еколого-геохімічного дослідження територій майданчиків вловлювання та складування піску і прилеглих до них територій важкими металами доволі обмежений [6-9].

Результати досліджень з оцінювання екологічного стану земель поблизу мулових полів № 1 і № 3 БСА на території Золочівської сільської громади Бориспільської району Київської області показали наявність у межах виокремлених поблизу мулових полів ділянок зафіксованого раніше підвищеного вмісту важких металів у ґрунтах, порівняно з фоновим, як за їх валовим вмістом, так і за вмістом рухомих форм [7, 9]. Проводилось дослідження екологічного стану накопичених осадів стічних вод м. Києва, де досліджувався хімічний склад, наявність поживних для сільськогосподарських культур речовин, чисельність мікроорганізмів та рівні забруднення важкими металами і радіонуклідами осадів стічних вод очисних споруд м. Київ [10, 11].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблема забруднення ґрунту важкими металами в районі розташування піскових майданчиків та місць їх складування слабо вивчена, та тим самим, не висвітлена у сучасних наукових часописах та спеціалізованих видань.

На сьогодні, велика увага приділяється забрудненню сільськогосподарських угідь, які розташовані в районі мулових майданчиків (далі – карт). Проте, забруднення ґрунту від функціонування піскових майданчиків є не менш важливим, ніж від діяльності мулових карт. Саме тому це питання потребує детального вивчення та розробки, на підставі отриманих результатів досліджень, комплексу заходів, що спрямовані на мінімізацію, запобігання та уникнення подальшого забруднення геохімічного середовища.

Новизна. В роботі вперше визначено геохімічні характеристики ґрунтів забруднених важкими металами в районі піскових майданчиків БСА та визначено сумарний показник забруднення ґрунту (СПЗ), проведено моніторинг вмісту важких металів за період з 2019 по 2024рр.

Методологічне або загальнонаукове значення. В майбутньому, за результатами отриманими в статті та в наступні роки планується провести оцінку акту-

ального стану забруднення ґрунту в межах майданчиків вловлювання та складування піску, і розробити методологічні та організаційно-технічні заходи, які дозволять мінімізувати можливий негативний вплив на прилеглі до них території, а саме на ґрунти та підземні і наземні водні об'єкти.

Метрологічне забезпечення лабораторних робіт. Лабораторні дослідження проб ґрунтів були виконані в атестованій санітарно-промисловій лабораторії ТОВ «ДОВКІЛЛЯ». При вимірюванні застосовані такі основні засоби вимірювальної техніки: спектрофотометри DR-2800; атомно-абсорбційний АА8500; фотометр фотоелектричний КФК-3; ваги лабораторні важільні АДВ-200 № 452; ВЛР- 200; іонімір «Sension1».

Викладення основного матеріалу. З метою проведення еколого-геохімічного моніторингу забруднення ґрунтів важкими металами в районі піскових майданчиків БСА було проведено польові, лабораторні та камеральні роботи.

Відбір ґрунтів в межах майданчика уловлювачів піску з метою встановлення концентрації важких металів здійснювався у шести пунктах моніторингової мережі (рис. 1). Відбір проб ґрунту здійснювався за методикою [12].

Коротка характеристика місць відбору проб за результатами ландшафтного обстеження: результат ландшафтного обстеження майданчика, який є безпосередньо дотичним до розташування уловлювачів піску показав, що формування ґрунто-

вого покриву в його межах відбувається, загалом, на техногенних відкладах і лише з південного боку від уловлювачів піску спостерігаються поверхневі відклади з вираженим гумусовим шаром, тим самим морфологічно відповідають ґрунтовому покриву. На захід від карт-уловлювачів, під час обстеження, спостерігались відвали виловленого піску значних об'ємів, які були раніше створені та підготовлені для подальшої утилізації. На самих відвалах піску, як і навколо уловлювачів ґрунтовий покрив ще не сформований, лише локально в деяких місцях спостерігається малопотужний (2-4 см) шар супіску з органічними рештками, який являє собою майбутній гумусовий шар.

У зв'язку з поліелементним характером забруднення поверхневих відкладів важкими металами, для визначення рівнів забруднення ґрунтів хімічними елементами застосовувалась методика сумарного показника забруднення (СПЗ або Z_c) згідно [13, 14]. Дана методика передбачає розрахунок сумарного показника (Z_c) рівня техногенного забруднення ґрунту хімічними елементами відносно їх фонового вмісту в ґрунтах (C_f) з метою подальшого порівняння цього показника із шкалою рівнів забруднення, а саме: $Z_c=8-16$ од. – допустимий; $Z_c=16-32$ од. – помірно-небезпечний; $Z_c=32-128$ од. – небезпечний; $Z_c=$ більше 128 од. – надзвичайно небезпечний.

У свою чергу, сумарний показник забруднення (Z_c) розраховувався за формулою:



Рис. 1. Розташування географічних координат контрольних точок мережі моніторингу відносно місцезнаходження об'єкта

$$Z_c = \sum C_i / C_\phi - (n-1), \quad (1)$$

де, C_i – вміст хімічного елемента в пробі;

C_ϕ – фоновий вміст хімічного елемента;

n – кількість хімічних елементів в пробі з аномальним вмістом ($C_i/C_\phi > 2$).

З метою надання геохімічної характеристики поверхневим відкладам відібрані проби були проаналізовані наближено кількісним спектральним та

атомно-адсорбційними аналізами. Отримані дані наведено у таблиці 1.

Із табл. 1 видно, що за результатами аналітичних досліджених проб ґрунтів із 32 досліджуваних елементів тільки Ag, Hg, Sn, Cd і в поодиноких пробах Cu, Pb, Ba утворюють аномальні концентрації ($C_i > 2 C_\phi$). Половина із цих елементів відносяться до I-го (Hg, Cd, Zn, Pb) та II-го (Cu) класів небезпеки. Аномальні концентрації таких елементів як Hg, Ag,

Таблиця 1

Результати дослідження концентрацій хімічних елементів в пробах ґрунтів в районі майданчика уловлювачів піску.

№ п.п.	№ проби	Місце відбору та матеріал проби	Хімічні елементи в мг/кг									
			Ti	Mn	P	V	Zr	Ba	Cr	Ga	Zn	Ni
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<u>1</u>	<u>1</u>	Ґрунт піщаний	4192	510	710	71	250	575	52	4	62	18
<u>2</u>	<u>2</u>	Ґрунт піщаний	4455	480	665	62	242	650	47	3	57	21
<u>3</u>	<u>3</u>	Ґрунт піщаний	3485	390	325	54	273	507	72	2	47	14
<u>4</u>	<u>4</u>	Ґрунт піщаний	5190	425	345	37	345	490	48	4	49	14
<u>5</u>	<u>5</u>	Ґрунт піщаний	4990	540	540	61	310	395	69	3	81	13
<u>6</u>	<u>6</u>	Ґрунт піщаний	4590	510	570	54	315	400	66	4	80	11
Середній вміст:			4484	476	526	53	289,2	503	59	3,3	62,6	15,2
Кк*** (відносно фону):			0,99	1,19	0,66	1,41	0,83	1,68	1,18	0,55	1,0	0,76
Фон ґрунтів району робіт:			4500	400	800	40	350	300	50	6,0	60	20
ГДК ґрунтів сільськогосподарського призначення (в країнах Європи):				1500 (300)		150 (50)			100 (100)		110 (300)	100 (50)
№ п.п.	№ проби	Місце відбору та матеріал проби	Хімічні елементи в мг/кг									
			Cu	Co	Pb	Sn	Ag	Mo	Ge	Nb	Y	Yb
1	2	3	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
<u>1</u>	<u>1</u>	Ґрунт піщаний	33	7	13	4	0,05	1	<1,2	17	15	2,2
<u>2</u>	<u>2</u>	Ґрунт піщаний	35	8	15	5	0,04	1	<1,2	14	12	2,1
<u>3</u>	<u>3</u>	Ґрунт піщаний	29	6	12	5	0,04	1	<1,2	18	11	2,2
<u>4</u>	<u>4</u>	Ґрунт піщаний	33	2	15	2	0,04	1,1	<1,2	18	13	2,0
<u>5</u>	<u>5</u>	Ґрунт піщаний	34	3	28	2	0,09	1,2	<1,2	21	17	2,7
<u>6</u>	<u>6</u>	Ґрунт піщаний	41	2	30	3	0,08	1,3	<1,2	21	17	2,8
Середній вміст:			34,2	4,7	18,8	3,5	0,057	1,1	<1,2	18,2	14,2	2,33
Кк*** (відносно фону):			1,71	0,58	1,26	1,75	1,89	0,73	1,0	1,21	0,94	1,55
Фон ґрунтів району робіт:			20	8,0	15	2,0	0,03	1,5	1,0	15	15	1,5
ГДК ґрунтів сільськогосподарського призначення (в країнах Європи):			32 (100)	50	32 (100)	50		5				

Закінчення табл. 1

№ п.п.	№ проби	Місце відбору та матеріал проби	Хімічні елементи в мг/кг												СПЗ**
			La	Ce	Sc	Li	Sr	Cd*	Hg*	Be	As	Au	U	Sb	
1	2	3	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
<u>1</u>	<u>1</u>	<i>Грунт піщаний</i>	<30	<40	<10	25	187	0,3	0,1	<3	<50	<5	<50	<20	3,86
<u>2</u>	<u>2</u>	<i>Грунт піщаний</i>	<30	<40	<10	25	141	0,3	0,06	<3	<50	<5	<50	<20	3,66
<u>3</u>	<u>3</u>	<i>Грунт піщаний</i>	<30	<40	<10	26	106	0,4	0,05	<3	<50	<5	<50	<20	2,5
<u>4</u>	<u>4</u>	<i>Грунт піщаний</i>	<20	<30	<10	26	122	0,4	0,08	<3	<50	<5	<50	<20	2,29
<u>5</u>	<u>5</u>	<i>Грунт піщаний</i>	<20	<30	<10	28	151	0,9	0,08	<3	<50	<5	<50	<20	5,1
<u>6</u>	<u>6</u>	<i>Грунт піщаний</i>	<20	<30	<10	29	164	1,1	0,09	<3	<50	<5	<50	<20	8,49
<i>Середній вміст:</i>			<20	<30	<10	26,5	145,2	0,57	0,077	<3	<50	<5	<50	<20	2,2
<i>Кк*** (відносно фону):</i>			1,0	1,0	1,0	1,77	1,45	1,13	2,19	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
<i>Фон ґрунтів району робіт:</i>			25	30	8,0	15	100	0,5	0,035	2,0	<50	<5	<50	<20	
<i>ГДК ґрунтів сільськогосподарського призначення (в крайних Європі):</i>								4 (3)	2,1	(10) **	10 (20)			4,5 (5)	

Примітки:

* – визначення хімічних елементів виконано атомно-адсорбційним аналізом;

** – сумарний показник забруднення ґрунту (СПЗ) розраховується тільки для проб з аномальним вмістом хімічних елементів за формулою: $Z_c = \sum C_i / C_{\phi} - (n-1)$, де C_i – вміст хімічного елементу в пробі, C_{ϕ} – фоновий вміст хімічного елементу в ґрунтах; n – кількість хімічних елементів в пробі з аномальним вмістом ($C_i/C_{\phi} > 2$); 8-16 – допустимий рівень забруднення; 16-32 – помірно-небезпечний рівень; 32-128 – небезпечний рівень;

*** – коефіцієнт концентрації хімічного елементу (Кк) – це відношення його середнього вмісту в ґрунті (C_i) до його фоновому вмісту (C_{ϕ}), ($KK=C_i/C_{\phi}$);

1 – жирним шрифтом виділені аномальні вмісти елементів, концентрація яких перевищує фоновий вміст в ґрунтах району робіт більше ніж у 2 рази.

Sn можна спостерігати у 50% проб – це провідні елементи забруднення (елементи-індикатори). В свою чергу, аномальні концентрації таких елементів, як Cd, Pb, Cu зустрічаються лише в поодиноких пробах (25% проб і менше) – це супутні елементи забруднення.

Концентрація Hg у відібраних літохімічних пробах коливається від 0,05 до 0,1 мг/кг при середньому значенні в 0,077 мг/кг, що в 2,19 рази перевищує фонове значення для ґрунтів району робіт – 0,035 мг/кг, та перевищує ГДК для ґрунтів сільськогосподарського призначення – 2,1 мг/кг.

Концентрація Ag у відібраних пробах коливається від 0,04 до 0,09 мг/кг при середньому значенні в 0,057 мг/кг, що в 1,89 разів перевищує фонове значення для ґрунтів району робіт – 0,03 мг/кг.

Концентрація Sn у відібраних пробах коливається від 2 до 5 мг/кг при середньому значенні в 3,5 мг/кг, що в 1,75 разів перевищує фонове значення для ґрунтів району робіт – 2 мг/кг.

Вміст Cd, в свою чергу, коливається від 0,3 до 1,1 мг/кг при середньому значенні в 0,57 мг/кг, що практично в 1,13 разів перевищує фонове значення – 0,5 мг/кг при ГДК в 4 мг/кг.

Вміст Cu коливається від 29 до 41 мг/кг при середньому значенні в 34,2 мг/кг, що практично в 1,71 разів перевищує фонове значення – 20 мг/кг при ГДК в 32 мг/кг.

Концентрація Pb варіюється від 12 до 30 мг/кг при середньому значенні в 18,8 мг/кг, що в 1,26 разів перевищує фонове значення – 15 мг/кг при ГДК в 32 мг/кг.

В свою чергу, вміст Ba у пробах коливається від 495 до 650 мг/кг при середньому значенні в 503 мг/кг. Перевищення – в 1,68 разів при фоновому значенні в 300 мг/кг.

Крім того, можна спостерігати, що максимальні концентрації елементів-індикаторів в ґрунтах виявлені в точках відбору проб № 5 та № 6. Дані контрольні пункти знаходяться на ґрунтовій «накатаній» дорозі, через яку, власне, і вивозяться спецтехнікою відходи з піскових майданчиків.

Отже, геохімічне забруднення досліджуваних проб (2024 рік) можна відобразити у вигляді упорядкованого ряду хімічних елементів (за середньою концентрацією):

$$Ag_{1,89} - Hg_{2,19} - Sn_{1,75} - Cu_{1,71} - Cd_{1,13} - Pb_{1,26} \quad (2)$$

Беручи до уваги дослідження за 2023 рік, показник геохімічного забруднення досліджуваних проб має наступний вигляд:

$$Ag_{2,0} - Hg_{2,22} - Sn_{1,9} - Cu_{1,73} - Cd_{1,2} - Pb_{1,29}$$

Результати порівняння середніх концентрацій провідних хімічних елементів (Ag, Hg, Sn, Cu, Cd, Pb) за поточний та попередні (2019 – 2024) роки проведення моніторингових робіт.

Таблиця 2

Динаміка зміни концентрацій основних хімічних елементів-забруднювачів в ґрунтах прилеглих територій до майданчика уловлювачів піску БСА за 2019-2024 роки

№	Хімічний елемент	Фоновий вміст у ґрунтах району робіт	Середній вміст хімічних елементів в мг/кг						Динаміка забруднення
			По роках (середнє значення)						
			2019 рік	2020 рік	2021 рік	2022 рік	2023 рік	2024 рік	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Hg	0,035	0,11	0,1	0,08	0,078	0,078	0,077	Зменшення
2	Cd	0,5	1,1	0,9	0,7	0,62	0,6	0,57	Зменшення
3	Cu	20	40	36	36	35,8	34,5	34,2	Зменшення
4	Sn	2	4	3,8	4,2	4,2	3,8	3,5	Зменшення
5	Pb	15	25	24	21	20,2	19,3	18,8	Зменшення
6	Zn	60	116	96	71	67	66,5	62,6	Зменшення
7	Ag	0,03	0,24	0,12	0,08	0,063	0,061	0,057	Зменшення
8	Cr	50	60	54	60	60	58,5	59,0	Практично без змін

Із табл. 2 видно, що середня концентрація провідних елементів забруднення в ґрунтах біля уловлювачів піску має тенденцію до зменшення. Дане зменшення незначне, але воно свідчить про стабілізацію процесу забруднення. Порівняння даних результатів дозволяє спрогнозувати динаміку негативного впливу функціонування піскових майданчиків на прилеглу територію.

Висновки. Підсумовуючи отримані результати геохімічного аналізу ґрунтів та враховуючи аналіз геохімічних формул, можна дійти висновку, що показник забруднення за провідними елементами забруднення (Ag, Hg, Sn, Cu, Cd, Pb) у 2023-му та 2024-му роках практично ідентичний. Спостерігається незначне зменшення концентрацій. На думку авторів, ідентичність елементів забруднення в досліджуваних пробах свідчить про їх генетичний зв'язок, що і є, в свою чергу, чітким аргументом впливу відходів БСА на прилеглу територію. Зауважимо, що найбільш ймовірними варіантами потрапляння важких металів із виловленого піску до ґрунтів прилеглої території є вітрова ерозія відвалів та механічне пере-

міщення виловленого піску з метою його подальшого вивезення та утилізації.

За результатами розрахунку СПЗ в досліджуваних пробах його значення коливалось від 2,29 до 8,49 од. при середньому значенні в 2,2 од., що відповідає допустимому рівню забруднення – до 16 од. (див. примітки табл. 1).

Отже, виходячи із вищенаведеного, можна дійти висновку, що негативний екологічний вплив уловлювачів піску БСА та відвалів на ґрунти прилеглих територій відповідає допустимому рівню забруднення.

Перспективи використання результатів досліджень. Отримані в статті результати можуть бути основою для розроблення регіональних природоохоронних програм, спрямованих на зменшення рівня антропогенного впливу на ґрунтовий покрив, а також порівняльної оцінки техногенного навантаження на ґрунти України та для розробки методологічних та організаційно-технічних заходів, які дозволять мінімізувати можливий негативний вплив на прилеглі до мулових майданчиків території.

Література

1. Л. О. Горбатюк, О. О. Пасічна, О. М. Арсан та ін. Особливості акумуляції фосфору гідрофітами водойм в районі Бортницької станції аерації (м. Київ). *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Сер. Біологія* / за ред. М. М. Барна, К. С. Волков, В. В. Грубінко [та ін.]. Тернопіль: ТНПУ, 2014. – Вип. 1 (58). С. 20–25.
2. Yatsiuk M., Shevchenko A., Bozhenko R., Lyutnitsky S. The effects of silt fields of Bortnytska aeration station on ecological state of land and water in the adjacent areas. *Land Reclamation and Water Management*. 2021. № 2. P. 114 – 128. <https://doi.org/10.31073/mivg202102-292>.
3. Delehan-Kokaiko, S., Slabkiy, G., Lukianova, V., & Anpilova, Y. Вплив сміттєзвалищ на показники захворюваності сільського населення та поширеності серед нього хвороб. *Екологічна безпека та природокористування*. 2020. 34(2). С. 43–52. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.2.43-52>
4. Наконечний І.В., Літвак О.А., Літвак С.М., Маринець О.М. Аналіз чинників, що впливають на процес біоре mediaції ґрунтів, забруднених нафтопродуктами. *Екологічні науки* № 4(49). 2023. С. 114-122. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.4-49.15>
5. Кривицька І.А. Вплив підприємства машинобудівельного профілю на екологічний стан ґрунтового покриву суміжних територій. *Екологічні науки* № 2(25), 2019. С. 89-93 <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-13>

6. Методи геоморфологічних досліджень: навч. посібник / Галина Байрак. Львів: ЛНУ імені Івана Франка. 2018. 292 с.
7. Методи геоекологічних досліджень: навчально-методичний посібник. Войтків Петро, Іванов Євген Львів : ЛНУ ім. І. Франка, 2022. 106 с.
8. Рибалова О.В., Мацак А.О., Курочка М.О. Екологічна небезпека забруднення ґрунтів важкими металами. *The 5th International scientific and practical conference "Innovative development of science, technology and education" (February 15-17, 2024)* Perfect Publishing, Vancouver, Canada, 2024. p. 239 – 248
9. Клос В.Р. та ін. Звіт за темою: «Моніторинг забруднення ґрунтів важкими металами на майданчику уловлювачів піску Бортницької станції аерації», ТОВ «ГЕОТЕХНОЛОГІЇ», Київ, 2020 р.
10. М.В. Яцюк, А.М. Шевченко, Р.П. Боженко, С.М. Лютицький Вплив мулових полів Бортницької станції аерації на екологічний стан земельних і водних ресурсів прилеглих територій. *Меліорація і водне господарство* 2021. № 2. с. 114-128 <https://doi.org/10.31073/mivg202102-292>
11. Василенко О.В., Балабак О.А., Балабак А.В., Нікітіна О.В., Гурський І.М. Оцінка стану міських ґрунтів як засіб збереження екологічної стабільності урбоєкосистеми. *Екологічні науки* № 1(46). 2023. с. 139-143 <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.1-46.23>
12. Про затвердження Інструкції з відбирання, підготовки проб води і ґрунту для хімічного та гідробіологічного аналізу гідрометеорологічними станціями і постами, Наказ ДСНС від 19.01.2016 № 30 <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0030388-16#Text>
13. О. О. Гололобова Оцінка поліелементного забруднення ґрунтів територій різного рівня антропогенного навантаження. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. № 1-2, 2011. с. 118-124
14. Гуцуляк В. М. Ландшафтна екологія. Геохімічний аспект: Навч. посібн. – 2-ге вид. – Ч.: ТОВ, Видавництво «Наші книги», 2010. 312с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.07.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 28.08.2025

Дата публікації:

STATE AND PROSPECTS OF USING REMOTE AIR MONITORING METHODS IN UKRAINE

Khabarova H.¹, Kovalenko G.², Barbashev S.³

¹Scientific Research Institution «Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems»
Kharkiv, Yevheniia Yenina Str., 6, 61165

²Institute of High Energy and Nuclear Physics of National Science Center
Kharkiv Institute of Physics and Technology
Akademichna Str. 1, 61108, Kharkiv

³Odesa Polytechnic National University
Shevchenko Ave., 1, 65044, Odesa

anetp@ukr.net, grygoryk0@gmail.com, josik65@gmail.com

One of the strategic directions of the state environmental policy to achieve the goals of sustainable development of Ukraine on the way to approximation of national legislation to EU legislation on preventive measures to preserve air quality and inform the population about possible risks to their health is to monitor the air during martial law and post-war reconstruction of Ukraine. The article defines the requirements of international legal acts and national legislation to the existing system of organising and conducting atmospheric air monitoring, including remote sensing methods. The article analyses the use of remote sensing methods and tools as effective tools for monitoring atmospheric air under martial law in Ukraine. Modern methods of collecting and processing data obtained from international platforms by means of remote sensing and satellite images are considered. The possibilities of their application in Ukraine for the purpose of identifying sources of pollution, assessing the quality of atmospheric air for further forecasting their changes are determined. An overview of modern remote sensing tools for early warning of environmental threats, forecasting changes in the state of atmospheric air in order to optimise measures to respond to the consequences of military impact and post-war recovery in Ukraine is presented. The importance of integrating innovative methods when implementing them in the State monitoring system to ensure operational control of atmospheric air is substantiated. It is proposed to use an integrated approach, the essence of which will include the selection of environmental information with the adaptation of appropriate models for the territory and conditions of Ukraine from existing international remote monitoring bases, its verification with ground stations for the effectiveness of environmental assessment and forecasting of the state of atmospheric air. *Key words:* state environmental policy, national legislation, remote sensing, international platforms, monitoring, forecasting, atmospheric air, environmental threats, consequences of military impact.

Стан та перспективи використання в Україні методів дистанційного моніторингу атмосферного повітря. Хабарова Г.В., Коваленко Г.Д., Барбашев С.В.

Одним із стратегічних напрямків державної екологічної політики для досягнення цілей сталого розвитку України на шляху наближення національного законодавства до законодавства ЄС щодо здійснення превентивних заходів збереження якості атмосферного повітря та інформування населення про можливі ризики для його здоров'я є ведення моніторингу атмосферного повітря в умовах воєнного стану та післявоєнного відновлення України. У статті визначені вимоги міжнародних нормативно-правових актів та національного законодавства до існуючої системи організації та проведення моніторингу атмосферного повітря, у тому числі дистанційними методами спостереження. Проаналізовано застосування методів та засобів дистанційного зондування як ефективних інструментів для моніторингу атмосферного повітря в умовах воєнного стану в Україні. Розглянуто сучасні методи збору та обробки даних, отриманих із міжнародних платформ засобами дистанційного зондування та за допомогою космічних знімків. Визначено можливості їх застосування в Україні з метою виявлення джерел забруднення, оцінювання якості атмосферного повітря для подальшого прогнозування їх змін. Представлено огляд сучасних засобів дистанційного спостереження для раннього попередження екологічних загроз, прогнозування змін стану атмосферного повітря з метою оптимізації заходів для реагування на наслідки впливу воєнного характеру та післявоєнного відновлення в Україні. Обґрунтовано значимість інтеграції інноваційних методів при їх впровадженні у державну систему моніторингу з метою забезпечення оперативного контролю атмосферного повітря. Запропоновано використання комплексного підходу, сутність якого включатиме вибірку екологічної інформації із адаптацією відповідних моделей для території та умов України з існуючих міжнародних баз дистанційного моніторингу, її верифікацію із наземними станціями для ефективності екологічного оцінювання та прогнозування стану атмосферного повітря. *Ключові слова:* державна екологічна політика, національне законодавство, дистанційне зондування, міжнародні платформи, моніторинг, прогнозування, атмосферне повітря, екологічні загрози.

General statement of the problem. The existing gaps in the field of state monitoring are associated with damage to surveillance systems during military operations, the use of outdated equipment and imperfect systems for filling environmental data bases that require technical and technological re-equipment in accordance with the current requirements of international law and data protection from cyberattacks.

It should be noted that Ukraine does not currently have its own remote sensing and satellite observation systems for monitoring the state of the atmospheric air, while the security situation of the consequences of military impact requires continuous environmental information to be obtained at the state level. It should be included in national environmental databases and transferred to international platforms, such as the European

Environmental Agency (EEA) [1]. In Ukraine, there is currently no system for obtaining information in this way. The use of relevant information from international platforms for further analysis, assessment and forecasting of the state of atmospheric air in Ukraine, taking into account environmental data accumulated in international databases, will facilitate the acquisition of environmental data, especially in areas that are difficult to access for air sampling, especially under martial law. This will become an important tool for making management decisions to prevent and minimise threats to the environment and public health.

The relevance of the research. International experience shows that in order to continuously obtain correct (correct, accurate and relevant) environmental data in the organisation and conduct of air monitoring with subsequent rapid response and appropriate decision-making in the event of possible threats to the environment and public health in conditions of man-made load, emergency cases, it is advisable to use remote sensing and satellite technologies. This is also true for Ukraine, if we also take into account the consequences of the war. Environmental data on the state of the atmospheric air obtained by means of remote sensing and satellite technologies reflect data on a large scale – from local areas to entire countries. The availability of these data will allow for timely assessment of air pollution with the presentation and construction of models for forecasting changes in the state of the air, determining the directions of spread of radioactive and chemical substances, and assessing potential risks. The results obtained by means of remote monitoring are appropriate and important for the creation of a national environmental data bank and a significant addition to existing statistics when creating registers of pollutant concentrations obtained by ground-based systems. This will enable prompt measures to be taken to reduce the impact of pollutants and improve air quality both at the national and international levels, taking into account information on transboundary transfers of pollutants.

Relation of the author's work to important scientific and practical tasks. The research is carried out in accordance with the State Programme 2701040 'Scientific and Scientific and Technical Activities in the Field of Environmental Protection and Natural Resources' commissioned by the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, in accordance with the medium-term priority areas of innovation activity at the industry level 'Widespread use of cleaner production technologies and environmental protection', approved by the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 787 of 5 July 2024 'Some issues of determining medium-term priority areas of innovation activity'.

Analysis of recent research and publications. Within the framework of the European Union's Copernicus Earth Observation Programme [2], which provides comprehensive information, including forecasts and analyses of the composition of the atmosphere,

including the concentration of greenhouse gases, various pollutants and aerosols, the European Space Agency (ESA) [3] provides access to Sentinel satellite data and databases. Some of the EU's Copernicus CAMS satellites are equipped with instruments capable of detecting and measuring radiation contamination. The EU Copernicus Sentinel-5P series satellites are equipped with the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) [4], which is capable of measuring the concentrations of various gases and aerosols in the atmosphere that affect air quality and climate, and its data are used to assess atmospheric conditions that affect the spread of radioactive substances. The mechanism of radiation background measurement by the EU's Copernicus programme [2] is based on the use of specialised satellite sensors that record gamma radiation. The data undergoes a calibration and correction process, after which it is integrated with information from ground-based systems to create accurate maps of radionuclide contamination distribution. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) [5] plays an important role in satellite Earth monitoring systems, in particular in the study of the atmosphere, as it is a medium-resolution spectrometer installed on NASA's Terra satellites [6]. The MODIS capabilities allow for the analysis of large areas, at a distance of about 2330 km, which allows for global imagery every 1-2 days. The advantages of using MODIS [5] in satellite air monitoring systems include measuring aerosol optical characteristics, which allows assessing the level of air pollution and the spread of fine particles; detecting pollution clouds, their structure, as well as tracking the concentrations of greenhouse gases and other atmospheric impurities; and global environmental control.

Various available image processing tools and software, including GIS technologies, are used to process remote sensing data.

Thus, the acquisition of environmental information by means of remote sensing has been greatly developed in different countries of the world and has expanded the possibilities of environmental monitoring. France has its own research laboratory specialising in the study of physical and chemical processes of the Earth's atmosphere and space observations (LATMOS) [7] and its own CHIMERE platform, which is implemented in the national system for air quality forecasts. In addition to Sentinel satellites, Metop-SG satellites with an innovative optical system with a high spectral resolution for passive infrared remote sensing are actively used throughout France, developed by the European Space Agency (ESA) [3]. Hungary, Spain and Morocco have implemented SAT-CEP-monitor systems [8], which are designed to effectively monitor air quality and integrate satellite data (Sentinel-5P) with local stations and forecasting capabilities in near real time. The world's first geostationary satellite for monitoring atmospheric air quality (GEMS) provides high-precision observations of atmospheric air quality

with wide coverage and hourly frequency for the East Asian region [9].

The scientific and practical experience in Ukraine is represented by the achievements of scientists of the National Academy of Sciences of Ukraine, the Ministry of Education and Science of Ukraine and the National Spacecraft Control and Testing Centre, whose research results are related to remote diagnostics of pre-emergency conditions at nuclear fuel cycle facilities using UAVs, equipped with infrared spectrometers [10], the use of UAVs (octocopters) with a gamma spectrometer to monitor the radiation situation in the areas affected by radiation sources, which allows detecting both point and distributed sources of radioactive contamination in real conditions [11]. The author of [12] proposed a conceptual approach to the development of a network of automated monitoring posts for a single integrated automated environmental radiation monitoring system in Ukraine, which combines existing automated and non-automated air radiation monitoring posts.

With regard to national legislation on atmospheric air monitoring, it should be noted that this issue is regulated by the Laws of Ukraine and regulations, which stipulate that atmospheric air monitoring is carried out, among other things, using innovative remote sensing technologies to obtain environmental data and assess the impact and forecast atmospheric air pollution. The Laws of Ukraine 'On Atmospheric Air Protection' [13] and 'On Environmental Protection' [14] provide the legal framework for monitoring the levels of radiation and chemical pollution in the atmosphere. The Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 13 June 2024 No. 684 'Some Issues of Functioning of the State Environmental Monitoring System and its Subsystems' [15] and the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 14 August 2019 No. 827 'Procedure for State Monitoring in the Field of Atmospheric Air Protection' [16] provide for the use of modern state-of-the-art methods of monitoring the radiation and chemical state of the atmospheric air, including the use of remote monitoring methods.

The Law of Ukraine 'On Nuclear Energy Use and Radiation Safety' [17] and the Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine 'On Approval of the Strategy of the Integrated Radiation Monitoring System for the Period up to 2024' [18] provide for the use of automated monitoring systems when monitoring the radiation situation.

In accordance with the reform of the national environmental policy of Ukraine on the way to EU integration and in accordance with the requirements of the Law of Ukraine 'On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period up to 2030' [19], it is envisaged to improve the radiation and chemical monitoring systems in Ukraine, which requires methodological, technical and legislative changes in accordance with international norms and standards.

In order to harmonise with the goals of the European Green Deal, the EU will significantly tighten standards for concentrations of gaseous substances and fine par-

ticles of 2.5 micrometres and less (PM_{2.5}) in the air at the end of 2024 and achieve the set thresholds by 2030. This will be achieved through the use of satellite data, devices that measure the characteristics of objects connected to the Internet, record changes in the environment and convert the data received for further processing and integration in real time. This is done in accordance with the requirements of the new Directive 2024/2881/EU on atmospheric air quality and cleaner air for Europe [20], whose target values are adapted to the World Meteorological Organization (WMO) recommendations for 2024 [21].

Based on the implementation of European developments and their international platforms, taking into account the information received by the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine in cooperation with the State Emergency Service of Ukraine on remote fire monitoring in Ukraine, the Ministry has developed its own scientific and practical experience in conducting, improving and developing radiation monitoring systems. It includes proposals of regulatory, methodological, technical nature [22], the concept of an automated system for monitoring the radiation situation in Ukraine and its improvement at NPPs [23].

It should be noted that the authors of this article have already developed and implemented the first state automated early warning system for radiation accidents: "Gamma-1 and Gamma-2 on the territory of Ukraine [24] and, taking into account the experience gained, modelled and predicted the environmental impact of NPPs and TPPs [25, 26], including in the transboundary context [27, 28].

Already then, the authors of the article proposed approaches to improving the state system of atmospheric air monitoring and developing Ukraine's own remote monitoring system, which includes the use of environmental databases formed in accordance with European standards by incorporating information obtained by remote monitoring in combination with data from stationary observation posts, its integration and verification.

Identification of previously unresolved parts of the general problem to which this article is devoted.

Based on the EU's international requirements in the field of air monitoring, the EU initiatives within the framework of the European Zero Pollution Action Plan strategy have been identified [29]. The aim of the strategy is to reduce air pollution and to implement and use an integrated platform for comparing the level of pollution in different EU countries (European Air Quality Index) [30] through the use of the European satellite air monitoring programme – Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) [2] and the transfer of monitoring data with reporting to the European Environment Agency (EEA) [1].

In line with the harmonisation of national legislation with EU requirements, in 2021 Ukraine joined the

European Air Quality Index Initiative [30]. According to this Initiative, environmental monitoring data on the state of air quality should be made available to the EEA platform [1], and radiological data should be made available to the European Radiological Data Exchange System (EURDEP) [31], which is developed and maintained by the European Commission's Joint Research Centre.

Ukraine already has experience in using international satellite technology platforms to obtain environmental monitoring data, including the European CAMS programme [2]. The State Space Agency of Ukraine and the National Space Facilities Management and Testing Centre analyse satellite images to assess changes in the state of the environment, including tracking the radiation background based on the results of atmospheric aerosol analysis using domestic and international remote sensing systems, as well as products and services created on their basis. The Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine, together with the State Emergency Service of Ukraine and the State Ecological Inspectorate of Ukraine, also use NASA [6] and ESA [3] satellite data to control the radiation situation and monitor forest fires in the Chernobyl zone. The public platform SaveEcoBot [32] uses international platforms of satellite remote sensing systems using NASA Terra satellites to display the results of radiation monitoring and displays the results in real time [6].

Currently, Ukraine does not have its own satellite technologies and platforms that have a database of pollutant concentrations in the air and can be used to assess the environmental status of the entire territory of the country or its individual regions. Ukraine currently has experience in using information obtained by remote sensing from international databases on forest fires [33] and dust storms. Therefore, by integrating this experience with the capabilities of international databases on other important components of atmospheric air monitoring obtained using remote sensing methods, it is possible to increase the effectiveness of the state monitoring system in terms of environmental assessment and modelling in dynamics, interactive mapping and real-time forecasting of the state of atmospheric air [33-35].

Novelty. The authors propose to supplement the existing state environmental monitoring system, which receives information from a network of stationary air monitoring stations in Ukraine [35], with an important component that uses remote monitoring methods, which consist of using modern international platforms, such as Copernicus [2] and NASA [6], to obtain environmental data, using innovative approaches in building models of the distribution of pollutants, taking into account all factors, and adaptation of the information to the territory of Ukraine and integration into its own national databases and platforms for assessing the state of the air.

The authors of this study define the term remote monitoring of the state of atmospheric air as a set of measures that involve contactless acquisition, transmission and

processing of information on the state of atmospheric air using automated stations, unmanned aerial vehicles, satellite systems and other technical means without direct operator intervention.

Such an integrated approach will provide an important tool for government agencies, which will increase efficiency in decision-making and help in developing state policy and planning appropriate measures to reduce and prevent air pollution and protect the public.

Methodological or general scientific significance.

The use in Ukraine of international platforms for obtaining remote air monitoring data, such as Copernicus [2] and NASA [6], and the latest satellite technologies will expand Ukraine's capabilities in collecting data on the concentration of radioactive substances, harmful chemicals and greenhouse gases in order to assess the state of the atmospheric air, track, model and predict its changes, taking into account the atmospheric processes of pollutant spreading. Combining existing national capabilities with international ones will help to provide early warning of negative processes in the air and monitor compliance with environmental standards, as well as allow for more accurate and more efficient management decisions to prevent harmful effects on the air.

To determine the possibility of implementing the proposed integrated approach in Ukraine, it is important to know the technical characteristics of remote sensing and satellite technologies in terms of obtaining environmental data in chemical and radiation monitoring of atmospheric air, as well as the aspects and advantages of their use [33, 35].

The authors of [34] note that the advantages of using the latest systems containing environmental data obtained by remote sensing are that they allow monitoring the state of atmospheric air in hard-to-reach areas in order to ensure efficiency in the event of emergencies and emergencies, and especially in martial law.

Thus, remote sensing data and satellite technologies for monitoring atmospheric air for radioactive and chemical pollution, together with data from stationary observation posts, are an important tool for timely detection and assessment of threats to improve the effectiveness of state-level warning systems and protect the public [33-35].

Conclusions. Currently, Ukraine does not have its own remote sensing systems and satellite technologies, and environmental monitoring data is provided by European and American platforms. The integration of environmental monitoring data from various sources, using satellite, aircraft, drone and ground-based systems, will provide a complete picture of the distribution of radioactive and chemical substances over a large area. This will allow us to respond to possible threats and air pollution in a timely manner. It is important to implement reforms at the legislative, organisational and methodological levels to improve the existing state environmental monitoring system. In addition, it is important to improve sensor technologies, namely the development

of new types of sensors with increased sensitivity and resolution to improve measurement accuracy through calibration between different platforms, including satellite data.

The use of satellite technologies to monitor atmospheric air for radiation and chemical pollution has a number of advantages that can significantly supplement the state monitoring system with environmental data, which is especially relevant in the context of martial law and post-war recovery in Ukraine. The use of satellite technologies, in particular the CAMS [2] and NASA [6] platforms, will increase the reliability of the results of monitoring the state of atmospheric air under conditions of man-made pollution, including during martial law in Ukraine. In addition, it will increase the efficiency of comparative analysis of air quality in different regions of Ukraine in order to identify high-risk areas, provide daily air forecasts, and monitor the process of global long-distance transport of pollutants in the air. The integration of satellite monitoring data into the state monitoring system will be useful in obtaining data for a comprehensive study of atmospheric air composition and making operational management decisions in Ukraine.

The application of the proposed integrated approach using remote sensing data and satellite technologies at the state level in the development of the state's environmental policy in accordance with the requirements of EU legislation will increase the efficiency of monitoring and obtaining a complete reliable assessment of the state of the atmospheric air with forecasting its changes and preventing possible consequences.

Prospects for using the research results. Further prospects for the development of this study are filling and creating databases for Ukraine through the use of international databases and platforms containing information obtained by remote sensing and satellite technologies, developing algorithms and models for combining this information with further integration and regulation, including with the help of artificial intelligence. The use of remotely sensed information in conjunction with information obtained from ground-based observation systems will make it possible to assess the environmental state of the air, predict its condition and minimise the impact of pollutants on public health. The implementation of the proposed integrated approach will be ensured by the availability of own databases and air monitoring platforms with verified values, which will allow for interactive mapping of the territory of Ukraine according to the list of priority air pollutants.

An important area for the development of satellite technologies in Ukraine is to attract international funds and partners with experience in satellite monitoring, especially at the initial stage of work. The ambitious goals are to create our own platforms and surveillance network that will meet European requirements, using our own satellites with integration into the international satellite surveillance network, based on the best international practices. In addition, it is important to engage international experts to train specialists in working with the latest remote monitoring systems, including processing and analysing data from such systems.

References

1. European Environmental Agency. веб-сайт. URL: <https://www.eea.europa.eu/en> (дата звернення: 01.07.2025).
2. Copernicus (CAMS) EU. веб-сайт. URL: <http://atmosphere.copernicus.eu> (дата звернення: 05.05.2025).
3. European Space Agency (ESA). веб-сайт. URL: <https://www.esa.int> (дата звернення: 21.06.2025).
4. The TROPOspheric Monitoring Instrument. веб-сайт. URL: <https://www.tropomi.eu> (дата звернення: 30.05.2025).
5. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. веб-сайт. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov> (дата звернення: 11.04.2025).
6. Global Modeling and Assimilation Office, NASA Goddard Space Flight Center. веб-сайт. URL: <https://gmao.gsfc.nasa.gov> (дата звернення: 01.03.2025).
7. Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales. веб-сайт. URL: <http://www.laetm.ipsl.fr/> (дата звернення: 07.07.2025).
8. Boudriki Semlali B.-E., El Amrani Ch., Ortiz G., Boubeta-Puig J., Garcia-de-Prado A. SAT-CEP-monitor: An air quality monitoring software architecture combining complex event processing with satellite remote sensing. 2024. *arXiv preprint*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.16339> (дата звернення: 07.07.2025).
9. Zhang C., Niu X., Wu H., Ding Z., Chan K. L., Kim J., Wagner T., Liu C. Unleashing the potential of geostationary satellite observations in air quality forecasting through artificial intelligence techniques. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2025. Vol. 25. P. 759–770. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-25-759-2025> (дата звернення: 07.07.2025).
10. Станкевич С., Дудар Т., Коваленко Г., Карташов В. Повітряний інфрачервоний моніторинг об'єктів ядерного паливного циклу в Україні. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2015. № 4(68). С. 31–36. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2015.4\(68\).06](https://doi.org/10.32918/nrs.2015.4(68).06) (дата звернення: 07.07.2025).
11. Zabulonov Y.L., Burtnyak V.M., Odukalets L.A. System for effective remote control and monitoring of radiation situation based on unmanned aerial vehicle. *Science & Innovation*. 2017. Vol. 13(4). P. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine13.04.040> (дата звернення: 07.07.2025).
12. Barbashev S.V. Approaches to building a network of automated radiation monitoring posts in the territory of Ukraine. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2024. № 3(151). DOI: <https://doi.org/10.46813/2024-151-142> (дата звернення: 07.05.2025).
13. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 15 листопада 2024 р. № 2707. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2707-12> (дата звернення: 31.01.2025).
14. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 15 листопада 2024 р. № 1264. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12> (дата звернення: 10.03.2025).
15. Деякі питання функціонування державної системи моніторингу довкілля та її підсистем: Постанова Кабінету Міністрів

- України від 13 червня 2024 р. № 684. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/684-2024-п#Text> (дата звернення: 11.02.2025).
16. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: Постанова Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 р. № 827 (Зі змін. від 07 травня 2023 р. № 513). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-п#Text> (дата звернення: 15.03.2025).
17. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 8 лютого 1995 р. № 39. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-вр#Text> (дата звернення: 21.04.2025).
18. Про схвалення Стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2022 р. № 323-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/323-2022-р> (дата звернення: 01.04.2025).
19. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28 лютого 2019 р. № 2697. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (дата звернення: 11.02.2025).
20. Directive (EU) 2024/2881 of the European Parliament and of the council of 23 October 2024 on ambient air quality and cleaner air for Europe. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=OJ:L_202402881 (дата звернення: 21.06.2025).
21. World Meteorological Organization. WMO Air Quality and Climate Bulletin No. 4. September 2024. Женева: WMO, 2024. вебсайт. URL: <https://wmo.int/publication-series/wmo-air-quality-and-climate-bulletin-no-4-september-2024> (дата звернення: 11.04.2025).
22. Барбашев С. В., Вітько В. І., Коваленко Г. Д. Радіаційний моніторинг в Україні: стан, проблеми та шляхи їх вирішення: монографія / за заг. ред. С. В. Барбашева. Одеса: Астропринт, 2011. 80 с.
23. Барбашев С. В., Вітько В. І., Коваленко Г. Д. Автоматизовані системи радіаційного контролю у навколишньому природному середовищі: монографія. Одеса: Астропринт, 2015. 132 с.
24. Автоматизована система радіаційного моніторингу та раннього оповіщення про радіаційні аварії («Гамма-1» та «Гамма-2») / Барбашев С. В., Вітько В. І., Волошин В. С., Коваленко Г. Д. Київ: Освіта України, 2016. 232 с.
25. Kovalenko G.D. Radioecology of Ukraine: monograph: Kharkiv, 2013, 3rd ed. 344 p.
26. Г.Д. Коваленко, Г.В. Хабарова. Методологія оцінювання екологічного ризику для теплових електростанцій України. *Основи моделювання в ергономії, екології і хімічній технології* / за заг. ред. д-ра техн. наук, професора С. М. Логвінкова. Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2017. С. 154 – 177.
27. Kovalenko G., Vitko V., Khabarova H. Poland-Ukraine: transboundary effects of thermal power plants emissions. *European Journal of Technical and Natural Science*. 2019. № 2. P. 33–36. DOI: <https://doi.org/10.29013/EJTNS-19-2-33-36>. (дата звернення: 10.07.2024).
28. Вітько В.І., Хабарова Г.В. Радіаційний вплив АЕС України та Європи на кордоні. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XVIII Міжнар. наук.-практ. конф., 13–17 вересня 2021 р. Харків: УкрНДІЕП, 2021. С. 85–93.
29. Zero Pollution Action Plan. веб-сайт. URL: https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en (дата звернення: 12.02.2025).
30. European Air Quality Index Calculation. веб-сайт. URL: <https://ecmwf-projects.github.io/copernicus-training-cams/proc-aq-index.html> (дата звернення: 03.02.2025).
31. The European Radiological Data Exchange Platform. веб-сайт. URL: <https://remon.jrc.ec.europa.eu/About/Rad-Data-Exchange> (дата звернення: 12.02.2025).
32. SaveEcoBot – Air quality monitoring tool. веб-сайт. URL: <https://www.saveecobot.com/widgets/air-quality-informer> (дата звернення: 12.06.2025).
33. Вітько В. І., Хабарова Г. В. Оцінювання забруднення атмосферного повітря радіаційними та хімічними речовинами під час воєнного стану в Україні за допомогою дистанційного моніторингу. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. ст. XX Міжнар. наук.-практ. конф., 19–20 вересня 2024 р. Харків: УкрНДІЕП, 2024. С. 107–111.
34. Khabarova H., Vitko V., Kovalenko G., Barbashev S. The role of modern remote sensing technologies in atmospheric air monitoring under martial law in Ukraine. *Proceedings of the XXIII conference on High Energy and Nuclear Physics*, 8–10 April 2025, Kharkiv, Ukraine. P. 176–179.
35. Khabarova H.V., Kovalenko G.D., Barbashev S.V. Application of satellite technologies for monitoring the radiation state of the atmospheric air during the war and post-war reconstruction of Ukraine. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2025. № 3(157). P. 194–199. DOI: <https://doi.org/10.46813/2025-157-194> (дата звернення: 10.07.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.25.

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КАТАЛІТИЧНОГО ОЧИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗІВ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА ВІД СІРЧИСТОГО АНГІДРИДУ

Белоконь К.В.

Запорізький національний університет
вул. Університетська, 66, 69600, м. Запоріжжя
kv.belokon@gmail.com

Агломераційні фабрики є великим забруднювачем атмосферного повітря. Проблема очищення газів агломераційних процесів є критично важливою для зменшення впливу на навколишнє середовище. Основні забруднюючі речовини агломераційного виробництва включають пил, діоксид сірки (сірчастий ангідрид), оксиди вуглецю та оксиди азоту. У статті описано існуючі методи очищення газів від сірчистого ангідриду та вибір схеми газоочистки, що включає каталітичний реактор, теплообмінник, скруббер-поглинач і два мокрих трубчастих електрофільтри. Перспективним методом очищення викидних SO_2 -вмісних газів є нестационарне каталітичне окиснення сірчистого ангідриду, у результаті переробки якого виходить сірчана кислота. Хімічне очищення дозволяє досягти ступеня знешкодження понад 90%, а одержана сірчана кислота може бути використана у прокатному виробництві.

Проведено розрахунки та вибір основного обладнання для системи очищення газу. Визначено площу фільтрації каталітичного реактора за умови сталості швидкості фільтрації, яка дорівнює 1 м/с, та витраті очищуваного газу 38,9 м³/с. Розроблено інтерметалічний Fe-Al каталізатор з температурою запалювання 200-350 °С. Розраховано об'єм каталізатора, який дорівнює 35 м³, з масою 21 т при насипній вазі 0,6 м³/т. Для зрошення газу застосовується скруббер-поглинач, площа насадки якого з 20% запасом становить 4620 м², що забезпечує необхідний об'єм насадки 77 м³ і висоту 2 м. Розраховано площу поперечного перерізу активної зони мокрого електрофільтра, яка складає 19,4 м², обрано два електрофільтри, що мають площу поперечного перерізу 9,6 м² і загальну площу осадження 530 м². Коефіцієнт очищення мокрого електрофільтра становить 98%. Для системи очищення обрано димотяг ДН-21 з коефіцієнтом корисної дії 0,83 та числом обертів 980 об/хв. Димотяг комплектується електродвигуном потужністю 320 кВт при напрузі 6000 В, що гарантує необхідний рівень ефективності системи очищення газів. *Ключові слова:* атмосферне повітря, екологічна безпека, агломераційне виробництво, каталітичний реактор, каталізатор, мокрий електрофільтр, сірчастий ангідрид, скруббер-поглинач.

Development of a system of catalytic purification of technological gases of agglomeration production from sulfur dioxide. Belokon K.

Sintering factories are major contributors to atmospheric pollution. The issue of gas purification from sintering processes is critically important for reducing environmental impact. The main pollutants from sintering production include dust, sulfur dioxide (sulfur dioxide), carbon oxides, and nitrogen oxides.

The article describes the existing methods of gas purification from sulfur dioxide and proposes a gas purification scheme comprising a catalytic reactor, a heat exchanger, a scrubber-absorber, and two wet tubular electrostatic precipitators. A promising approach for cleaning exhaust SO_2 -containing gases is non-stationary catalytic oxidation of sulfuric anhydride, which results in the production of sulfuric acid. Chemical purification can achieve a neutralization rate exceeding 90%, and the sulfuric acid obtained can be used in rolling production.

Calculations and selection of the main equipment for the gas purification system were carried out. The filtration area of the catalytic reactor was determined under the condition of constant filtration velocity of 1 m/s, with a purified gas flow rate of 38.9 m³/s. An intermetallic Fe-Al catalyst with an ignition temperature of 200-350 °C was developed.

The catalyst volume was calculated to be 35 m³, with a mass of 21 tons and a bulk density of 0.6 m³/t. For gas irrigation, a scrubber-absorber is employed, with a nozzle area of 4620 m² (including a 20% reserve), ensuring a nozzle volume of 77 m³ and a height of 2 m. The cross-sectional area of the active zone in the wet electrostatic precipitator was calculated to be 19.4 m². Two electrostatic precipitators with a cross-sectional area of 9.6 m² and a total deposition area of 530 m² were selected. The cleaning coefficient of the wet electrostatic precipitator is 98%. For the gas purification system, a DN-21 induced draft fan with an efficiency of 0.83 and a rotational speed of 980 rpm was selected. The fan is equipped with a 320 kW electric motor operating at 6000 V, ensuring the required efficiency of the gas purification system. *Key words:* atmospheric air, ecological safety, sintering production, catalytic reactor, catalyst, wet electrostatic precipitator, sulfuric anhydride, scrubber-absorber.

Постановка проблеми. Особливо актуальною проблемою порушення екологічної безпеки міста є забруднення атмосферного повітря викидами промислових газів [1]. Одним із основних газів-забруднювачів є сірчастий ангідрид (SO_2).

Основними видами виробничої діяльності людини, які вносять значний внесок у забруднення повітряного басейну діоксидом сірки, є теплоенергетика (котельні процеси), чорна металургія (підготовчі процеси, основні металургійні виробництва);

хімічна, нафтохімічна, нафто- та газопереробна (виробництво нітрозної та контактної сірчаної кислоти, карбофосу), целюлозно-паперова та деревообробна промисловість [2].

На металургійних підприємствах більше 80% сірчистих з'єднань проникає в атмосферу разом із газами агломераційних фабрик.

Агломераційне виробництво отримало широке поширення у чорній металургії для огрудування пиловатих залізних руд та їх концентратів. Агломерація відбувається шляхом спікання. Процес агломерації пов'язаний з певними змінами хімічного складу й структури спікаємих матеріалів. Зокрема, у ході агломерації із шихти виділяється багато шкідливих домішок, у тому числі й сірка.

Джерелами забруднення повітряного басейну на аглофабриках є агломераційні стрічки, барабанні й чашкові охолоджувачі агломерату, випалювальні печі, вузли пересипання, транспортування, сортування агломерату й компонентів, що входять до складу шихти для готування агломерату (руди, коксу, вапняку й інших матеріалів). Також достатня кількість пилу виділяється при розтріскуванні агломерату при русі й вібрації конвеєра. Найбільше поширення, а, отже, і найбільше пиловиділення відбувається при скиданні агломерату зі стрічки конвеєра у хвостовій частині агломашини.

Найбільш ефективним засобом боротьби з викидами пилу і шкідливих газоподібних компонентів у повітряний басейн підприємствами є установки газоочисних апаратів, що в результаті зменшують та стабілізують шкідливі викиди при одночасному зростанні об'єму і інтенсифікації промислового виробництва [3].

Актуальність дослідження. Діоксид сірки – один із найбільш токсичних забруднювачів атмосфери та головний фактор утворення кислотних дощів, випадання яких має катастрофічні наслідки для довкілля. Проживання на території з постійним перевищенням концентрації SO_2 над нормами ГДК також призводить до значних порушень у стані здоров'я населення [1].

Викиди сірчистого газу в біосферу негативно впливають на всі компоненти навколишнього середовища: на ґрунтовий та рослинний покриви, водні об'єкти, живі організми. У людини забруднення повітря двоокисом сірки викликає як гострі, так і хронічні отруєння [1].

Довготривала дія невеликих концентрацій є наслідком появи захворювань органів дихання та травлення, кон'юнктивіту, захворювань шкіри, відчуття слабкості; руйнування зубів та зниження працездатності (до повної втрати). При вдиханні великих концентрацій він викликає подразнення дихальних шляхів, оболонки ока, дратуються зволожені ділянки шкіри, може призвести до смерті [4].

Місто Запоріжжя – великий металургійний центр України, де на відносно невеликій площі розташовано

40% чорної та кольорової металургійної промисловості, 20,5% хімічної та машинобудівельної промисловості, 41% енергетики. Тому для міста Запоріжжя та, власне, й для багатьох інших промислових міст України, що мають значну кількість джерел забруднення атмосферного повітря, обґрунтування безпечних для здоров'я обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря є досить актуальним [3]. Найбільшими забруднювачами атмосферного повітря в регіоні залишаються підприємства чорної та кольорової металургії, теплоенергетики, хімії, машинобудування, харчової промисловості, на які припадає приблизно 90,0 % викидів всіх забруднюючих речовин.

Це такі підприємства як: ПАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь», АТ «Запорізький завод феросплавів», ПрАТ «Український графіт», ПрАТ «Запорізький абразивний комбінат», ПрАТ «Запоріжжюкс», ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», ПрАТ «Запоріжвогнетрив», ПрАТ «Запорізький завод зварювальних флюсів та скловиробів», АТ «Мотор Січ» та інші.

Викиди діоксиду та інших сполук сірки в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів складають у місті 4,2 тис. т [5].

У місті Запоріжжі середнє значення коефіцієнту небезпеки для ангідриду сірчистого при хронічному інгаляційному впливі у 2023 році перевищує допустимий рівень $HQ = 2,5$ та знаходиться на середньому рівні ($HQ = 1-5$, існує ризик розвитку шкідливих ефектів у особливо чутливих підгруп населення, є неприпустимим для населення, допустимий для виробничих умов) [1].

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Згідно рекомендації ВООЗ рекомендовані значення SO_2 : 0,020 мг/м³ середньодобове значення; 0,5 мг/м³ значення усереднене на 10 хв. Наказ МОЗ України від 10.04.2024 р. № 813 «Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць» встановлюють для населених місць України середньодобову гранично допустиму концентрацію (ГДК) $\text{SO}_2 = 0,05$ мг/м³; максимально разову ГДК – 0,5 мг/м³ [4]. Враховуючі те, що однією зі стратегічних цілей національної екологічної політики України є покращення екологічного стану довкілля та підвищення рівня екологічної безпеки шляхом зменшення обсягу викидів загальнопоширених забруднюючих речовин стаціонарними джерелами, необхідне значне зниження викидів SO_2 , щоб досягнути встановлених рекомендацій.

Одним з найбільш ефективних методів захисту атмосферного повітря від забруднення SO_2 є впровадження перспективних безвідходних ресурсо- й енергозберігаючих технологічних процесів, що дозволяють уникнути або суттєво знизити викиди цих речовин в атмосферу [6]. Але це не завжди тех-

нологічно можливо й економічно доцільно. Тому проблеми зниження викидів повинні вирішуватись як шляхом удосконалення й інтенсифікації традиційних методів очищення газових викидів, так і шляхом використання нових альтернативних, екологічно та економічно ефективних методів. Одним з ефективних процесів знешкодження газових викидів від SO_2 є каталітичне окиснення [7]. Посилення санітарних та екологічних норм змушує шукати нові ефективні та економічні каталізatori для знешкодження відхідних газів промислових підприємств. Перспективним напрямком в цій галузі є розробка каталізаторів із заміною благородних металів на інтерметалідні сполуки. Чисельні літературні дані свідчать про те, що формування каталізаторів на інтерметалідній основі сприяє збільшенню їх каталітичної активності та термічної стійкості [8].

У зв'язку з цим, перспективним і актуальним напрямком є розробка каталізаторів на інтерметалідній основі для знешкодження техногенних забруднювачів. Вирішення цієї задачі дозволить дозволить поліпшити стан навколишнього природного середовища до рівня, безпечного для життєдіяльності населення, з урахуванням європейських стандартів якості навколишнього природного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для вилучення сірчистого ангідриду з газів застосовуються такі методи (рис. 1):

- абсорбційні (використаються рідкі поглиначі) та адсорбційні (використаються тверді поглиначі);
- каталітичні методи – окиснення сірчистого ангідриду в присутності каталізатора до сірчаного ангідриду (SO_3) із поглинанням останнього водою й утворенням сірчаної кислоти, а також окиснення в рідкій фазі до сірчаного ангідриду, що потім перетворюється в сірчану кислоту за допомогою перекису водню, азотної кислоти й інших окислювачів);
- каталітичне відновлення до елементарної сірки.

Найпоширеніші є абсорбційні способи. Абсорбція являє собою процес розчинення газоподібного компонента в рідкому розчиннику. Абсорбційні системи розділяють: водні й неводні. У другому випадку

застосовують звичайно малолетючі органічні рідини. Рідину використовують для абсорбції тільки один раз або ж проводять її регенерацію, виділяючи забруднювач у чистому виді. Схеми з однократним використанням поглинача застосовують у тих випадках, коли абсорбція приводить безпосередньо до одержання готового продукту або напівпродукту. Схеми з багаторазовим використанням поглинача (циклічні процеси) поширені ширше. Їх застосовують для вловлювання вуглеводнів, очищення від SO_2 димових газів ТЕС, очищення вентиляційних газів від сірководню залізно-содовим методом з одержанням елементарної сірки.

Менш поширені адсорбційні методи. Їх можна рекомендувати для випадків, коли в газах присутній не більше 0,1-0,15% SO_2 , немає пилу й домішок, що забруднюють або руйнують адсорбенти. Адсорбентами служать активоване вугілля, срібно-марганцеві композиції, складні сорбенти на основі окислів алюмінію, заліза, кобальту й ін.

Найбільше поширення одержали каталітичні методи знешкодження відхідних газів у нерухомому шарі каталізатора. Можна виділити два принципово різних методи здійснення процесу газоочистки – стаціонарному й у штучно створюваному нестаціонарному режимах.

При стаціонарному методі прийнятні для практики швидкості хімічних реакцій досягаються на більшості дешевих промислових каталізаторах при температурі 200-600° С. Після попереднього очищення від пилу (до 20 мг/м³) і різних каталітичних отрут (As, Cl₂ і ін.) гази звичайно мають значно більше низьку температуру. Підігрів газів до необхідних температур можна здійснювати за рахунок уведення гарячих димових газів або за допомогою електронагрівача. Після проходження шару каталізатора очищені гази викидаються в атмосферу, що вимагає значних енерговитрат. Домогтися зниження енерговитрат можна, якщо тепло газів, що відходять, використати для нагрівання газів, що надходять в очищення. Для нагрівання служать звичайно рекуперативні трубчасті теплообмінники. За певних

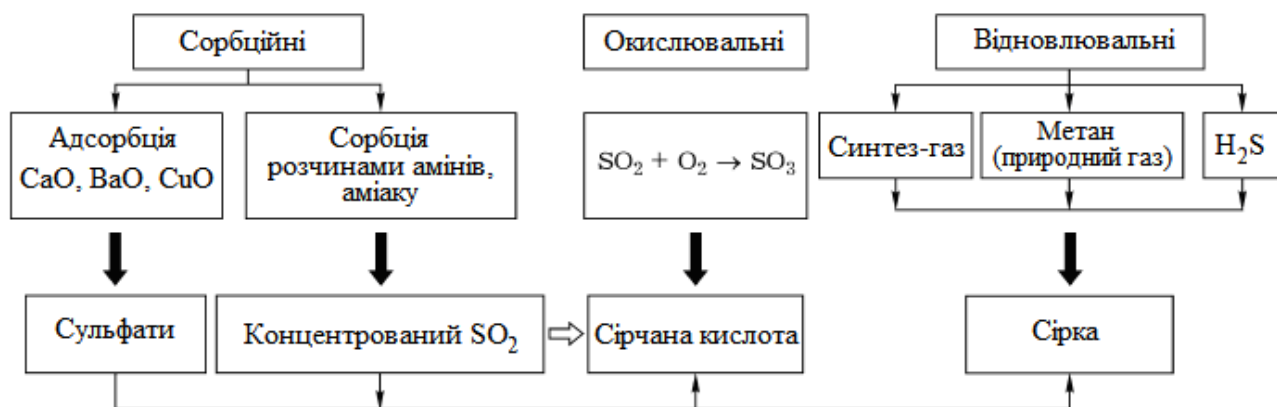


Рис. 1. Існуючі способи очищення газів від діоксиду сірки

умов, коли концентрація горючих домішок у газах, що відходять, перевищує $4-5 \text{ г/м}^3$, здійснення процесу за схемою з теплообмінником дозволяє обійтися без додаткових витрат. Такі апарати можуть ефективно працювати тільки при постійних концентраціях (витратах) або при використанні зроблених систем автоматичного керування процесом.

Метод нестационарної конверсії діоксиду сірки призначений для переробки слабосірчаних відхідних газів металургійних виробництв у сірчану кислоту (рис. 2). Основна ідея нестационарного способу окиснення діоксиду сірки полягає в тому, що каталізатор виконує не тільки свою основну функцію – прискорення реакції, але також і функцію регенератора тепла. Процес здійснюється в контактному апараті, який працює в нестационарному режимі, що забезпечується періодичною зміною напрямку подачі газу.

Впровадження процесу нестационарного окиснення дозволяє здійснювати переробку слабосірчаних газів з концентрацією діоксиду сірки $1-4\%$, заощаджувати $2,9 \text{ тис. т}$ умовного палива в рік [9, 10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Основним напрямком розвитку термокаталітичних методів є створення дешевих каталізаторів, що ефективно працюють при низьких температурах та є стійкими до різних отрут, а також розробка енергозберігаючих технологічних процесів з малими капітальними витратами на устаткування.

Наразі процес каталітичного очищення газових викидів від діоксиду сірки здійснюють на ванадієвих каталізаторах. Попри свою ефективність, ці каталізатори мають низку недоліків. Ванадієві каталізатори піддаються отруєнню контактними отрутами, фізичному зносу внаслідок стирання та впливу високих температур, а також залишаються доволі дорогими [11].

У зв'язку з цим, розробка ефективного, надійного та дешевого каталізатора для очищення газо-

вих викидів від діоксиду сірки є актуальним науково-технічним завданням. Для реакції окиснення SO_2 у SO_3 ряд активності металів як каталізаторів має такий вигляд [11]: Pt , V_2O_5 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 , WO_3 , CuO , As_2O_5 , TiO_2 , MoO_3 , SnO_2 , Mn_2O_3 . З цього ряду видно, що оксиди V_2O_5 , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 є ефективними каталізаторами для реакції окиснення SO_2 у SO_3 .

Для вирішення цього завдання було розроблено каталізатор на основі інтерметаліду FeAl зі структурою Ренея. В якості основи для отримання каталізаторів інтерметалідного типу можуть бути використані Fe , Co , Ni , Cu , Cr , Mo , Si , Al , Mg та інші метали. Для дослідження можливості використання в каталітичних реакторах більш дешевих контактів були обрані інтерметалідні каталізатори на основі заліза з добавками кобальту, хрому, ванадія, марганцю та міді. Вибір цих систем ґрунтувався на низькій міркуванні, таких як виключення використання дорогіших металів; висока активність у процесах глибокого окиснення, що використовуються у системах очищення промислових газів; високі міцність та термостійкість, що дуже важливо для контактів, що працюють у каталітичних нейтралізаторах; широке використання в різних галузях промисловості та гарна виробнича база для масового виробництва інтерметалідних каталізаторів.

У зв'язку з цим, було вирішено досліджувати інтерметаліди FeAl при використанні в якості каталізатора окиснення сірчистого ангідриду, що міститься у відхідних газах промислових підприємств. Залізо та алюміній утворюють інтерметаліди: FeAl_3 , Fe_2Al_7 , Fe_2Al_5 , FeAl_2 , FeAl , Fe_3Al . В якості досліджуваного каталізатора використовували системи на основі інтерметаліду Fe-Al стехіометричного складу FeAl_3 , синтезовані методом теплового самозаймання. З метою збільшення каталітичної активності інтерметалід FeAl_3 був модифікований різними кількостями кобальту, ванадію, хрому, марганцю, міді в кількостях до $15 \text{ масових \%}$. Скелетний каталізатор отримували шляхом вилугування отриманого

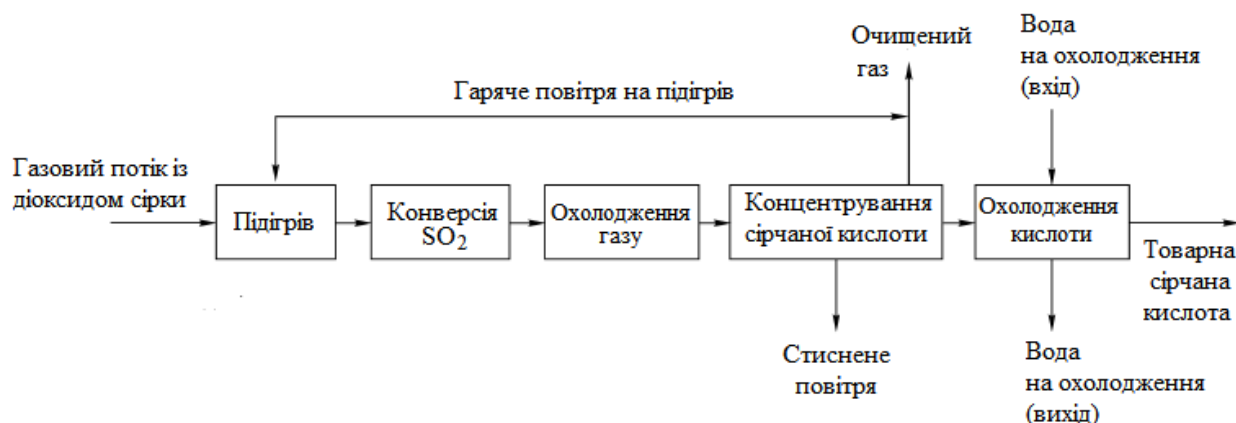


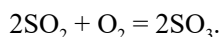
Рис. 2. Схема процесу окиснення сірчистого ангідриду в присутності каталізатора до сірчаного ангідриду SO_3 із поглинанням останнього водою й утворенням сірчаної кислоти

інтерметаліду різними кислотами та лугом з подальшим видаленням залишкового водню розчином перекису водню.

Новизна статті полягає у розробці системи каталітичного очищення технологічних газів від сірчистого ангідриду на розробленому інтерметалідному каталізаторі в умовах агломераційного цеху.

Методологічне або загальнонаукове значення.

У статті пропонується очищення технологічних газів від сірчистого ангідриду, що утворюється у виробництві агломерату (рис. 3). Процес обраного хімічного очищення агломераційних газів здійснюється у такий спосіб. Після пилоочищення газу надходять у відділення хімічного очищення, де головну роль грає реактор каталітичного окиснення (рис. 4). Газу підігріваються при першому запуску пальником до температури запалювання каталізатора. Відбувається окиснення по реакції:



Ця реакція – екзотермічна, іде з виділенням тепла – відбувається нагрівання газів. Газу після реакції проходять через шар насадки й нагрівають її. Далі газу надходять у теплообмінник, де прохолд-

жуються очищеним газом до температури 80-100°C і попадають у скруббер, де зрошуються. Зрошення здійснюється переважно водою, залежно від вмісту SO_3 і водяної пари. Відбувається абсорбція з одержанням сірчаної кислоти, що надходить у циркуляційний бак і потім частина кислоти виводиться, а інша частина попадає на зрошення знову. Очищені газу містять краплі зрошувальної рідини і надходять у мокрий електрофільтр (рис. 5), що слугує краплеуловлювачем. Після очищення газу надходить у теплообмінник, де підігрівається відхідними газу вище температури крапки роси й через димар викидається в атмосферу.

Даний метод має такі переваги: ступінь очищення досягає більше 90%, вміст сірки на виході з димаря не перевищує норматив ПДВ; одержання сірчаної кислоти, яку можна використати на інших ділянках підприємства, наприклад у прокатці.

Для каталітичного реактора були виконані розрахунки таких параметрів: площа фільтрації, об'єм каталізатора, що визначається на основі умови сталості об'ємної швидкості процесу, маса каталізатора, висота шару каталізатора, діаметр каталізатора та загальна висота каталізатора.

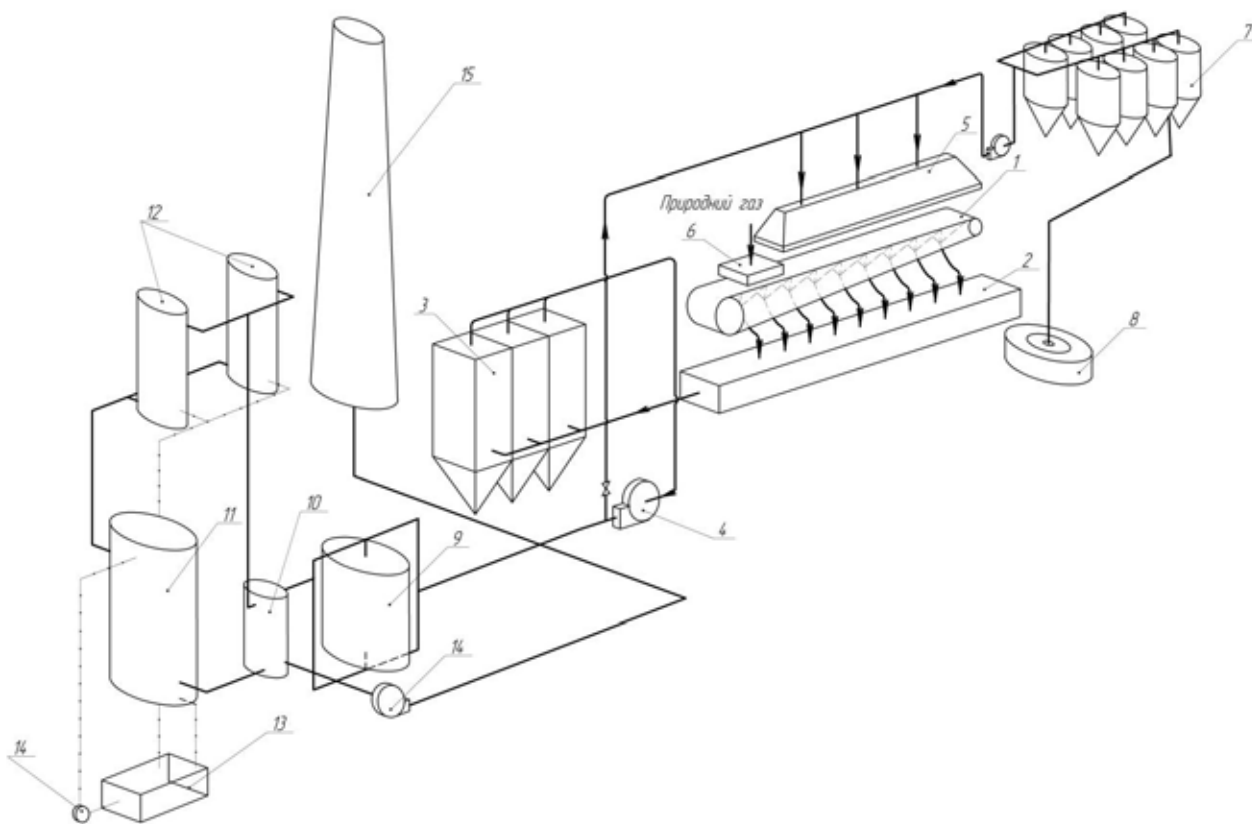


Рис. 3. Технологічна схема очистки агломераційних газів

1 – агломераційна машина, 2 – колектор, 3 – електрофільтр, 4 – ексгаустер, 5 – укриття агломашини, 6 – горн, 7 – група циклонів, 8 – охолоджувач, 9 – каталітичний реактор, 10 – теплообмінник, 11 – скруббер-поглинач, 12 – мокрий електрофільтр, 13 – бак для кислоти, 14 – димотяг, 15 – димова труба

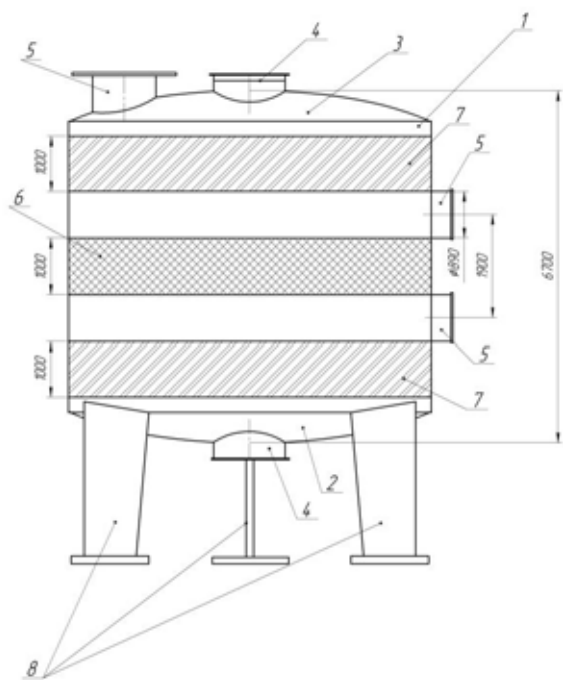


Рис. 4. Каталітичний реактор

1 – корпус; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – патрубок газу;
5 – оглядовий люк; 6 – каталізатор; 7 – насадка; 8 – опора

Для скрубера-поглиначи були розраховані: площа насадки, загальний об'єм насадки, внутрішній діаметр холодильника та висота насадки.

Для мокрого електрофільтра були визначені такі характеристики: необхідна площа поперечного перерізу активної зони електрофільтра, фактична швидкість газу в електрофільтрі, критична напруженість електричного поля, критичне напруження корони для електрофільтра, лінійна щільність струму корони, напруженість електричного поля, питома поверхня осадження та коефіцієнт очищення.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для впровадження на підприємствах металургійної промисловості, що сприятиме зниженню рівня шкідливих викидів і поліпшенню екологічної ситуації.

Викладення основного матеріалу. За результатами розрахунків каталітичного реактора (рис. 4) площа фільтрації, що визначалася за умови сталості швидкості фільтрації, яка становить 1 м/с, і витраті очищуваного газу, дорівнює 38,9 м³/с.

Температура запалювання розробленого інтерметалідного каталізатора становить в межах 200-350°C, розрахунковий об'єм каталізатора становить 35 м³, висота шару каталізатора – 0,9 м. Маса каталізатора складає 21 т при насипній вазі 0,6 м³/т. Швидкість фільтрації в реакторі становить 1м/с, об'ємна швидкість фільтрації – 4000 с⁻¹.

Обираючи скрубера-поглинач, враховуємо витрату газу Q = 167 кг/год. Площа насадки із запасом 20%

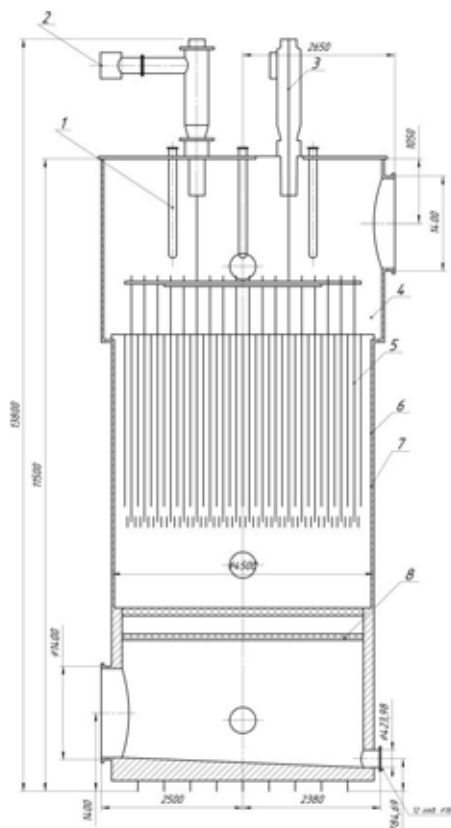


Рис. 5. Мокрий електрофільтр

1 – установка форсунок; 2 – коробка для підвода тока; 3 – ізоляторна коробка; 4 – коронуючий електрод; 5 – осаджуючий електрод; 6 – корпус; 7 – футеровка корпуса; 8 – газорозподільна решітка

складає 4620 м², що забезпечує необхідний об'єм насадки 77 м³, а її висота – 2 м.

З огляду на витрату газу за робочих умов та швидкість його руху в електрофільтрі, що становить 2,5 м/с, розраховуємо необхідну площу поперечного перерізу активної зони електрофільтра, яка дорівнює 19,4 м². Для забезпечення ефективного очищення обираємо два електрофільтри ШМК-9,6 (рис. 5), кожен з яких має площу поперечного перерізу 9,6 м², а загальна площа осадження осаджуючих фільтрів складає 530 м². Коефіцієнт очищення у мокрому електрофільтрі становить 98%. Для забезпечення роботи електрофільтру обираємо агрегат живлення типу АТФ-1000 (АТПОМ-1000).

Димотяг для установки обирається на основі аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту. Загальний опір газового тракту складає 3580 Па. Продуктивність димотяга приймається із запасом 10%, незалежно від температури газів, але з виправленням на барометричний тиск. Для забезпечення належної ефективності процесу очищення газу до установки приймаємо димотяг ДН-21, який має наступні технічні характеристики: витрата газу – 130 000 м³/год; створюваний тиск (розрізнення) – 5787,9 Па; коефіцієнт корисної дії – 0,83;

число оборотів – 980 об/хв. Димотяг комплектується електродвигуном ДАМСО 157-8, потужність якого становить 320 кВт при напрузі в мережі 6000 В. Ці характеристики забезпечують необхідний рівень продуктивності та ефективності роботи системи газоочищення.

Отже, технічна норма продуктивності газоочисної установки складає 140000 м³/год; початкова концентрація SO₂ – 1 г/м³; кінцева концентрація SO₂ – 0,02 г/м³; питома витрата води на зрошення – 5,25 л/м³.

Висновки. Описано існуючі методи очищення газів від сірчистого ангідриду, їх переваги та недоліки. На основі цього обрано найбільш ефективну схему каталітичного очищення агломераційних газів, яка включає каталітичний реактор, теплообмінник, скруббер-поглинач та два мокрих трубчастих електрофільтри. В системі очищення газів використовували каталізатор на основі інтерметаліду Fe-Al стехіометричного складу FeAl₃, синтезований методом

теплого самозаймання. З метою збільшення каталітичної активності інтерметалід FeAl₃ був модифікований різними кількостями кобальту, ванадію, хрому, марганцю, міді в кількостях до 15 масових %. Запропонований метод хімічного очищення дозволяє досягти ступеня очищення SO₂ понад 98%, що забезпечує відповідність нормативам ПДВ. Окрім того, одержана сірчана кислота може бути використана в інших виробничих процесах підприємства, зокрема у прокатному виробництві, що підвищує економічну ефективність системи.

Обрана схема очищення є технічно обґрунтованою та надійною, забезпечує високу ефективність очищення газів при великих обсягах оброблюваних газів і має позитивний екологічний вплив на навколишнє середовище. Результати досліджень можуть бути корисними для впровадження на підприємствах металургійної промисловості, що дозволить знизити рівень шкідливих викидів та поліпшити екологічну ситуацію.

Література

1. Белоконь К. В., Мальований М. С., Тарабан Є. В. Оцінка ризику для здоров'я населення від техногенного навантаження на атмосферне повітря м. Запоріжжя. *Екологічні науки*. 2023. № 5(50). С. 30-36. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.5>
2. Манідіна Є. А., Рижков В. Г., Манідін В. С. Очищення технологічних газів агломераційного виробництва. *Металургія*. 2016. Вип. 1. С. 96-99.
3. Гордієнко Д. Р., Тарабан Є. В., Белоконь К. В. Впровадження ефективних методів очищення промислових викидів для покращення екологічної ситуації у місті Запоріжжя. *Екологічні науки*. 2024. № 6 (57). С. 209-215. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.31>
4. Манідіна Є.А., Смотраєв Р.В., Троїцька О.О., Беренда Н.В. Технологія очищення промислових газових викидів від сульфур(IV) оксиду (SO₂) розчинами сполук заліза (II, III). Теорія і практика металургії. Вип. 3. 2018. С. 33-36.
5. Запорізька обласна державна адміністрація. Департамент захисту довкілля. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища Запорізької області у 2023 році. м. Запоріжжя. 2024. 188 стор.
6. Методи очищення газових викидів від хімічно-небезпечних речовин для підвищення ефективності фільтрувальних систем / О. В. Галак [та ін.]. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2018. № 18 (1294). С. 89-93.
7. Manidina Y., Belokon K., Berenda N., Troitska O. Using plasma catalysis for oxidation of sulphur dioxide to sulphur trioxide. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*. 2021. Vol. 8 (1). P. 15-21.
8. Белоконь К. В. Дослідження впливу фазового складу NI-AL каталізаторів на їхні фізико-хімічні та каталітичні властивості при знешкодженні газових викидів в атмосферу. *Суднобудування та морська інфраструктура*. 2020. № 1 (13). С. 38-45.
9. Дзевочко О.М., Подустов М.О., Дзевочко А.І., Пашко А.І. Аналіз методів очищення відхідних газів від двооксиду сірки. *Моделювання процесів промислового обладнання*. 2023. № 3. С. 13–23. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2023.3.02>
10. Яворський В. Т., Гелеш А. Б., Яворський І. Є., Калимон Я. А. Теоретичний аналіз хемосорбції сульфур(IV) оксиду. Обґрунтування вибору ефективного масообмінного апарата. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 6 (79). С. 32-40. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.60312>
11. Белоконь К.В. Розробка інтерметалідних каталізаторів для знешкодження вуглецевмісних компонентів газових викидів в атмосферу : монографія. Херсон : ТОВ «Видавничий дім «Гельветика», 2019. 174 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

РОЛЬ МОДЕЛЕЙ ПАСТОК У ВИРІШЕННІ ЗАВДАНЬ СУЧАСНОЇ НАФТОГАЗОВОЇ ГЕОЛОГІЇ

Владимиров Р.В.

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

У статті висвітлено актуальні проблеми розвитку нафтогазової геології в контексті необхідності вдосконалення теоретичних моделей пасток вуглеводнів. В умовах енергетичної трансформації, зменшення доступності традиційних родовищ та ускладнення геологічної будови нових пошукових регіонів зростає потреба у створенні більш адаптивних, багатofакторних моделей, здатних забезпечити точне прогнозування локалізації покладів. Обґрунтовано, що класичні підходи до класифікації пасток – структурні, стратиграфічні, літологічні – потребують доповнення гідродинамічними і геохімічними критеріями, а також цифровими інструментами прогнозування.

Метою дослідження стало теоретичне обґрунтування до розроблення інтегрованої типології пасток та необхідності створення цифрових моделей, що враховують просторову мінливість геологічних параметрів. Методологія базується на комплексному аналізі геофізичних даних, структурно-формаційному підході, сценарному та гідродинамічному моделюванні, а також застосуванні елементів штучного інтелекту та машинного навчання.

У результаті дослідження було проаналізовано типологічну схему пасток, апробовану на даних Дніпровсько-Донецької западини, яка показала вищу ефективність комбінованих моделей. Проведений аналіз цифрового моделювання в середовищі Petrel, що дозволило збільшити точність прогнозування перспективних зон на 25–30%. Запропоновано теоретичну гібридну модель, що поєднує структурні, стратиграфічні та гідродинамічні чинники в єдиній обчислювальній системі, яка адаптується до нових геологічних умов на основі аналізу накопичених даних.

Наукова новизна полягає у розробці універсального теоретичного підходу до типізації пасток з урахуванням їх еволюції в геологічному часі та використанні методів цифрового аналізу. Практична значущість результатів полягає у можливості їх використання для підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт, мінімізації ризиків буріння, обґрунтування інвестицій у складних і нетрадиційних регіонах видобутку. *Ключові слова:* структурно-формаційний аналіз, комбіновані пастки, гідродинамічне моделювання, цифрова геологія, машинне навчання, флюїдоперенос, адаптивна модель, геологорозвідка.

The role trap models in solving problems of modern oil and gas geology. Vladimirov R.

The article highlights the current problems of oil and gas geology development in the context of the need to improve theoretical models of hydrocarbon traps. In the context of energy transformation, reduced accessibility of traditional deposits and the complication of the geological structure of new exploration regions, there is a growing need to create more adaptive, multifactorial models capable of providing accurate prediction of the localization of deposits. It is substantiated that classical approaches to trap classification – structural, stratigraphic, lithological – need to be supplemented with hydrodynamic and geochemical criteria, as well as digital forecasting tools.

The aim of the study was to provide a theoretical justification for the development of an integrated trap typology and the need to create digital models that take into account the spatial variability of geological parameters. The methodology is based on a comprehensive analysis of geophysical data, a structural-formational approach, scenario and hydrodynamic modeling, as well as the application of elements of artificial intelligence and machine learning.

As a result of the study, a typological scheme of traps was analyzed, tested on data from the Dnieper-Donetsk Basin, which showed higher efficiency of combined models. An analysis of digital modeling was carried out in the Petrel environment, which allowed to increase the accuracy of forecasting promising zones by 25–30%. A theoretical hybrid model was proposed, combining structural, stratigraphic and hydrodynamic factors in a single computing system that adapts to new geological conditions based on the analysis of accumulated data.

The scientific novelty lies in the development of a universal theoretical approach to the typification of traps, taking into account their evolution in geological time and the use of digital analysis methods. The practical significance of the results lies in the possibility of their use to increase the efficiency of geological exploration, minimize drilling risks, and justify investments in complex and unconventional production regions. *Key words:* structural-formational analysis, combined traps, hydrodynamic modeling, digital geology, machine learning, fluid transport, adaptive model, geological exploration.

Постановка проблеми. В умовах енергетичної трансформації та геополітичної нестабільності роль нафтогазової геології не лише не зменшується, а, навпаки, набуває нового значення. Забезпечення енергетичної безпеки країн, стабільність енергоринку та розвиток інфраструктури залежать від ефективності геологорозвідувальних робіт. У цьому контексті одним із ключових напрямів є вдосконалення методології виявлення, класифікації та моделювання пасток вуглеводнів. Теоретичні моделі пасток ста-

новлять фундаментальну основу для передбачення локалізації нафтогазових скупчень, що безпосередньо впливає на прийняття рішень щодо буріння, розвідки та експлуатації родовищ.

Впродовж десятиліть формувалася складна система класифікацій пасток – від структурних і стратиграфічних до комбінованих та неструктурних, що відображає багатоманітність геологічних

умов формування покладів. Теоретичні моделі пасток стали інструментом узагальнення геологічних спостережень, дозволяючи будувати передбачення щодо наявності покладів у нових регіонах. У ХХІ столітті із розвитком комп'ютерних технологій, ГІС-аналізу, сейсморозвідки та моделювання за допомогою штучного інтелекту зросла потреба у переосмисленні класичних підходів і розвитку нових, мультидисциплінарних теоретичних моделей пасток [2, с. 107].

Актуальність дослідження. Сучасна нафтогазова геологія стикається із низкою викликів, серед яких варто виокремити збіднення традиційних ресурсів, необхідність переходу до важковидобувних покладів, глибоководну та арктичну геологорозвідку, а також вимоги до зменшення екологічного впливу. У таких умовах теоретичні моделі пасток мають не лише відображати класичні уявлення про геологічну будову, а й інтегрувати знання із суміжних галузей – геофізики, гідродинаміки, цифрової геології. Від ефективності таких моделей залежить здатність галузі передбачати, знаходити і використовувати нові родовища.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторське дослідження ґрунтується на комплексному підході до моделювання нафтогазоносних пасток, що включає формаційний аналіз, сценарне прогнозування та гідродинамічне моделювання, з інтеграцією інструментів штучного інтелекту та машинного навчання. Така міждисциплінарна методологія дозволила досягти якісно нових результатів у прогнозуванні перспективних об'єктів в умовах складної геологічної будови.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій з теми дослідження дозволяє відзначити активізацію досліджень у напрямі уточнення та деталізації класифікацій пасток. Зокрема, українські дослідники, такі як І.В. Височанський, акцентують увагу на важливості структурно-формаційного аналізу та розвитку регіональних моделей [1, с. 28]. Водночас американські та канадські школи приділяють більше уваги гідродинамічним моделям і ролі флюїдопереносу у формуванні пасток. Попри це, багато аспектів залишаються відкритими: недостатня кількість комплексних моделей, що враховують не лише геологічну будову, але й фізико-хімічні властивості порід і флюїдів; відсутність єдиної інтегрованої класифікації пасток, яка б об'єднувала знання із різних регіонів світу; потреба у розробці динамічних моделей, здатних змінюватися залежно від нових геологічних даних [1, с. с. 2873].

Таким чином, актуальність дослідження ролі теоретичних моделей пасток у вирішенні завдань сучасної нафтогазової геології зумовлена як практичними потребами галузі, так і науковою необхідністю подальшого розвитку теорії пасток. Проблематика полягає у потребі інтеграції сучасних технологій,

оновлення класифікацій та побудови моделей, що дозволяють більш точно прогнозувати просторову локалізацію вуглеводневих покладів у складних геологічних умовах. У цьому контексті теоретичні моделі пасток розглядаються як ключовий елемент геологічного прогнозування, без якого неможливе ефективне функціонування нафтогазової галузі у майбутньому [3, с. 26].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою є дослідження теоретичних моделей пасток у вирішенні актуальних завдань сучасної нафтогазової геології та розробка ефективних методологічних підходів до їх створення, адаптації і використання. Досягнення цієї мети передбачає вирішення таких завдань: узагальнення існуючих класифікаційних підходів, аналіз тенденцій у розвитку теорії пасток, а також практичну оцінку ефективності моделей у контексті геологорозвідувальних завдань.

Новизна. Наукова новизна статті полягає у комплексному підході до дослідження теоретичних моделей пасток у сучасній нафтогазовій геології з акцентом на їхню адаптацію до складних геологічних умов та впровадження цифрових технологій. Уперше здійснено критичний аналіз існуючих класифікаційних систем із позиції їхньої ефективності для пошуку нетрадиційних родовищ, запропоновано вдосконалену типологію пасток, що враховує гідродинамічні, тектоно-стратиграфічні та флюїдодинамічні чинники в єдиній обчислювальній системі. Стаття розширює теоретичну базу моделювання пасток шляхом поєднання класичних геологічних підходів із методами цифрового аналізу, зокрема із використанням машинного навчання. Представлено авторську гібридну модель пасток, яка демонструє підвищену точність прогнозування перспективних зон, а також доведено доцільність використання такої моделі для зниження ризиків буріння та підвищення ефективності геологорозвідувальних робіт.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження базується на міждисциплінарному підході, який передбачає інтеграцію геологічних, геофізичних, гідрогеологічних та цифрових даних. Основним матеріалом для аналізу стали опубліковані геолого-геофізичні карти, результати буріння, сейсморозвідки та геохімічні характеристики продуктивних пластів, зібрані в межах родовищ Східноєвропейської платформи, зокрема Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ), а також з відкритих баз даних провідних нафтогазових компаній і наукових публікацій [1, с. 28].

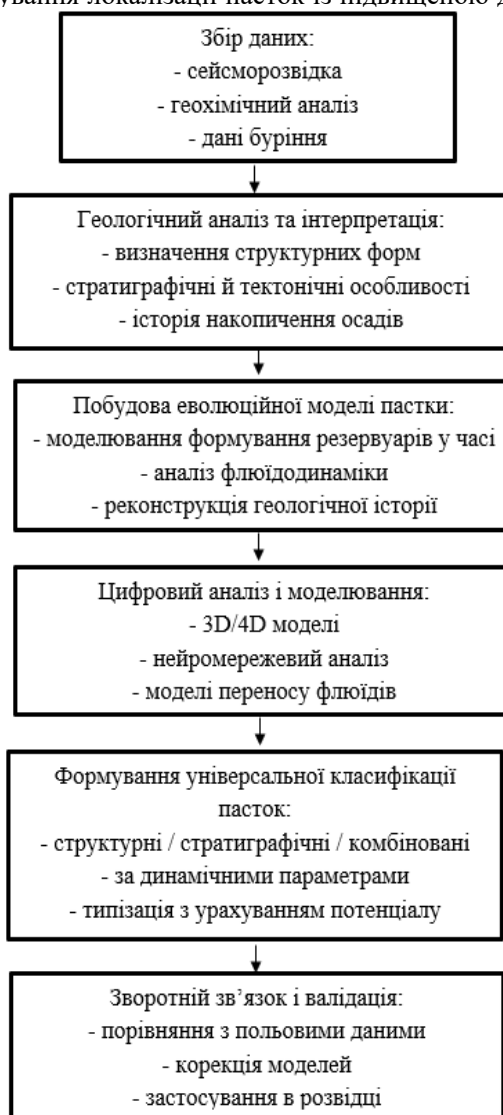
З метою побудови, верифікації та порівняння теоретичних моделей пасток було використано такі методи: структурно-формаційний аналіз, стратиграфічне розчленування, морфолого-структурна інтерпретація сейсмічних даних, модельно-прогнозне картування, аналіз флюїдодинаміки та цифрове моде-

лювання з використанням спеціалізованих програмних комплексів (Petrel, GeoModeller, Schlumberger PetroMod). Крім того, застосовано метод аналізу трендів у просторово-часових розподілах пасток, а також методику сценарного моделювання з урахуванням невизначеностей геологічних параметрів.

Важливим етапом дослідження є систематизація існуючих класифікацій пасток, з метою побудови уніфікованої типології, що дозволяє зіставити різні типи пасток у різних геодинамічних ситуаціях. Ретроспективний аналіз розвитку теоретичних моделей виконувався на основі аналізу наукових публікацій та патентних джерел, що дало змогу простежити еволюцію уявлень про умови формування та функціонування пасток.

Додатково проводилося порівняльне моделювання впливу гідродинамічних і термобаричних умов на стабільність пасток із використанням кінетичних моделей міграції вуглеводнів. Застосування методу нечіткої логіки та елементів машинного навчання дозволило сформувати адаптивну модель прогнозування локалізації пасток із підвищеною достовірністю.

З
при
моде
існу
здат
гічн
вищ
у на
В
веде
типс
турн
та кс
зації
анал
Е
Дніп
що і
комб
скла
паст
і ма
часу
у
вияв
пере
тоді
ють
циф
вимі
прог
точн
з кл



я на
вого
вати
, які
оло-
під-
чень
про-
нену
рук-
ічні
типі-
вого
із
ено,
стки
енти
Такі
ність
ного
було
ерна
типу,
ажан-
ання
три-
ості,
дло
янні

Блок-схема 1. Універсальний підхід до типізації пасток

Узагальнення результатів сценарного моделювання показало, що моделі, які враховують змінність тектонічних режимів і флюїдодинаміки, дозволяють краще прогнозувати розвиток пасток у складнобудованих регіонах. Наприклад, у північній частині ДДЗ виявлено ряд потенційно перспективних ділянок, які не фіксувалися у попередніх дослідженнях, але були ідентифіковані за допомогою гібридної моделі, що поєднує структурні та динамічні фактори.

Окрему увагу було приділено перевірці ефективності побудованих моделей у зіставленні з фактичними даними буріння. Встановлено, що у 80% випадків моделі правильно ідентифікували зони з підвищеною ймовірністю нафтогазонасичення. У 20% випадків похибки були пов'язані із недосконалою геофізичною роздільною здатністю або недостатністю стратиграфічного деталювання, що вказує на напрями подальшого вдосконалення моделей.

Результати досліджень свідчать про те, що сучасна теорія пасток вуглеводнів повинна розвиватися в напрямі синтезу класичних підходів із новітніми цифровими методами. Аналіз засвідчив, що традиційні моделі, зокрема антиклінальні та літологічні пастки, залишаються ефективними в окремих геологічних умовах, проте їхня прогностична спроможність значно зростає у випадку застосування комбінованих моделей із урахуванням флюїдодинаміки та тектоно-стратиграфічних факторів. Такий підхід забезпечує вищу достовірність оцінок при переході до складновидобувних, нетрадиційних та прикордонних зон видобутку.

Порівняння побудованих моделей із реальними даними буріння підтвердило доцільність використання складних геодинамічних моделей, які враховують не лише морфологічну будову пастки, а й умови її формування та трансформації впродовж геологічного часу. Саме динамізм, багатфакторність і адаптивність теоретичних моделей виявляються визначальними для сучасної нафтогазової геології.

Аналіз підходів, запропонованих у працях Височанського І.В., дозволяє констатувати важливість формаційного підходу в поєднанні з тектонічним аналізом [1, с. 28]. Американські дослідники, натомість, акцентують увагу на інтеграції гідродинамічного моделювання та геохімічної еволюції флюїдів. Обидва напрями мають право на існування та можуть бути використані в межах єдиної багаторівневої моделі. Прогнозується, що саме підхід до комбінування є перспективним напрямом подальших досліджень, який дозволяє поєднати глибину академічної геологічної теорії з прикладними потребами індустрії.

Окремо слід зазначити, що ключовим фактором

успішності теоретичних моделей пасток стає якість вхідних геологічних, геофізичних і гідрогеологічних даних. Саме тому необхідним є розвиток геоданих високої роздільної здатності та розширення їх використання в автоматизованих системах прийняття рішень. У цьому контексті використання машинного навчання, нейронних мереж і адаптивної аналітики може стати визначальним фактором розвитку теорії пасток у найближчому майбутньому.

Загалом результати дослідження свідчать про необхідність подальшої розробки інтегрованих теоретичних моделей, які могли б оперативнo адаптуватися до різних типів геологічного середовища, підвищуючи не лише ефективність пошуків, а й економічну доцільність розвідки нових родовищ.

Головні висновки. Проведене дослідження підтвердило ключову роль теоретичних моделей пасток у вирішенні актуальних завдань сучасної нафтогазової геології. Зростаюча складність геологічних умов, потреба в ефективному пошуку нетрадиційних джерел вуглеводнів, а також вимоги до оптимізації розвідки й видобутку ресурсів зумовлюють необхідність розвитку нових типів моделей, здатних враховувати широкий спектр геологічних, фізико-хімічних і динамічних параметрів.

На основі аналізу геофізичних даних, класифікаційних підходів і цифрового моделювання було теоретично доведено, що найбільш ефективними виявляються комбіновані моделі пасток, які враховують не лише структуру пластів, але й гідродинаміку, тектоно-стратиграфічні особливості та флюїдоперенос. Вони демонструють високу відповідність прогнозам і дозволяють зменшити ризики при бурінні та оцінці перспективності ділянок.

Прогнозується, що застосування адаптивних моделей з використанням машинного навчання відкриває нові горизонти для автоматизованого прогнозування пасток, особливо в умовах обмеженої інформації.

Таким чином, подальші дослідження мають бути спрямовані на такі напрями: формування універсальної класифікаційної системи пасток; інтеграцію глибокого геологічного аналізу з новітніми інформаційними технологіями; розвиток динамічних, самонавчальних моделей, що здатні адаптуватися до різних геолого-структурних умов. Реалізація цих завдань дозволить значно підвищити ефективність геологорозвідувальних робіт і забезпечити стабільний розвиток нафтогазової галузі в умовах глобальних трансформацій енергетичного ринку.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати проведеного дослідження

мають високий прикладний потенціал для подальшого впровадження у практику геологорозвідувальних і промислових робіт у нафтогазовій галузі. Зокрема, запропоновані комбіновані моделі пасток можуть бути використані при побудові високоточних геолого-геофізичних карт і тривимірних цифрових моделей продуктивних пластів у складних регіонах із недостатнім обсягом даних. Врахування гідродинамічних і стратиграфічних чинників дозволяє суттєво знизити ймовірність похибок у процесі прогнозування продуктивності покладів та оптимізації буріння. У перспективі впровадження розроблених підходів сприятиме підвищенню економічної ефективності проєктів, мінімізації ризиків, а також забезпеченню більш екологічно збалансованої експлуатації ресурсів відповідно до глобальних вимог сталого розвитку.

Література

1. Умови формування несклепінних пасток вуглеводнів у приштокових зонах південно-східної частини Дніпровсько-Донецької западини / І. В. Височанський, А. О. Яковлев, І. М. Самчук та ін. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, 2022. – Вип. 56. – С. 24-48. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-56-02>
2. Дворянин Є.С., Кабишев Б.П., Пригарина Т.М. Нафтогазоносний потенціал Південного борту Дніпровсько-Донецької западини. *Держ. геофіз. підпр. «Укр- геофізика»*. Київ, 1996. С. 106-122.
3. Корнієнко М.О. Критерії перспективності території на наявність покладів газу у пастках не антиклінального походження на прикладі комбінованих пасток північних флангів Донецької складчастої споруди та Бахмутської улоговини. *Роль вищих навчальних закладів у розвитку геології: матеріали Міжнар. наук. конф.*, 31 бер. – 3 квіт. 2014 р., м. Київ. – К., 2014. – Ч. 2. – С. 26-28.
4. Amy L. A. A review of producing fields inferred to have upslope stratigraphically trapped turbidite reservoirs: Trapping styles (pure and combined), pinch-out formation, and depositional setting. *AAPG Bulletin*, 103(12), 2019. 2861–2889. <https://doi.org/10.1306/02251917408>

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ВРАХУВАННЯ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В ОЦІНЦІ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ТЕХНОЛОГІЙ УТЕПЛЕННЯ БУДІВЕЛЬ

Коваленко Ю.Л., Дмитренко Т.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків
yurii.kovalenko@kname.edu.ua, tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua

У статті виконано порівняльну оцінку життєвого циклу (LCA) трьох поширених теплоізоляційних матеріалів – базальтової мінеральної вати, пінополістиролу (EPS) і екструдованого пінополістиролу (XPS), які використовуються для зовнішнього утеплення стін. Дослідження охоплює всі етапи «від видобутку сировини до кінця життя» (cradle-to-grave) для 1 м² утеплення товщиною 100 мм відповідно до стандартів ISO 14040–14044. Визначено ключові екологічні показники – потенціал глобального потепління (GWP), кислотифікація (AP), озоноруйнівний потенціал (ODP), фотохімічне утворення смогу (POCP), евтрофікація (EP), кумулятивне енергоспоживання та екоотоксичність. Особливу увагу приділено екологічним аспектам: викидам парникових газів, витратам енергії, токсичності відходів, довговічності матеріалів та способам утилізації. Встановлено суттєві відмінності екологічного профілю між мінеральною ватою, EPS та XPS протягом їх життєвого циклу. Усі три матеріали достатньо довговічні (термін служби більше ніж 50–60 років) і внаслідок економії енергії окупають свої втілені впливи на довкілля протягом перших кількох років експлуатації будівлі. Висновки роботи підтверджують, що, за умови відповідального поводження з відходами, найкращий екологічний профіль серед традиційних утеплювачів має EPS. Наведено рекомендації щодо раціонального застосування матеріалів та покращення екологічної стійкості утеплення.

Встановлено, що незалежно від обраного матеріалу, зовнішнє утеплення фасадів є екологічно доцільним заходом. За 60 років експлуатації утеплення дозволяє скоротити викиди CO₂ на порядок більше, ніж було викинуто при виробництві утеплювача. Вуглецевий «термін окупності» вкладеної енергії та емісій для теплоізоляції становить від кількох місяців до 2–3 років залежно від матеріалу і клімату. **Ключові слова:** життєвий цикл, теплоізоляційні матеріали, енергозбереження, викиди CO₂, оцінка впливу на довкілля, екологічний ефект.

Consideration of the life cycle of thermal insulation materials in the environmental impact assessment of building insulation technologies. Kovalenko Yu., Dmytrenko T.

This paper presents a comparative life cycle assessment (LCA) of three common thermal insulation materials – basalt mineral wool, expanded polystyrene (EPS) and extruded polystyrene (XPS) – used for exterior wall insulation. The study covers all stages of the cradle-to-grave life cycle for 1 m² of 100 mm thick insulation in accordance with ISO 14040–14044. Key environmental indicators were determined, including global warming potential (GWP), acidification (AP), ozone depletion potential (ODP), photochemical smog formation (POCP), eutrophication (EP), cumulative energy consumption, and ecotoxicity. Particular attention is paid to environmental aspects: greenhouse gas emissions, energy consumption, waste toxicity, durability of materials, and disposal methods. Significant differences in the environmental profile between mineral wool, EPS and XPS throughout their life cycle have been identified. All three materials are quite durable (service life is more than 50–60 years) and, due to energy savings, pay for their embodied environmental impacts within the first few years of the building's operation. The conclusions of the study confirm that, subject to responsible waste management, EPS has the best environmental profile among traditional insulation materials. Recommendations for the rational use of materials and improvement of the environmental sustainability of insulation are given.

It has been established that regardless of the material chosen, external facade insulation is an environmentally sound measure. Over 60 years of operation, insulation can reduce CO₂ emissions by an order of magnitude more than was emitted during the production of the insulation. The carbon «payback period» of the invested energy and emissions for thermal insulation ranges from several months to 2–3 years, depending on the material and climate. **Key words:** life cycle, thermal insulation materials, energy saving, CO₂ emissions, environmental impact assessment, ecological effect.

Постановка проблеми. Зовнішнє утеплення стін є ключовим заходом енергоефективного будівництва та термомодернізації існуючих будинків. Правильно обраний утеплювач мінімізує тепловтрати через огорожувальні конструкції, підвищує комфорт і довговічність будівлі, а також дозволяє суттєво скоротити витрати енергії на опалення і кондиціонування. За оцінками, якісна теплоізоляція житлового будинку може знизити енергоспоживання на опалення до 50–70%, що веде до еквівалентного зменшення викидів CO₂ протягом десятиліть експлуатації [1,2]. Таким чином, утеплення має значний позитивний

екологічний ефект у масштабі життєвого циклу будівлі. З іншого боку, виготовлення теплоізоляційних матеріалів, їх транспортування, монтаж та утилізація супроводжуються певними негативними впливами на довкілля – емісіями парникових та інших забруднювальних газів, споживанням невідновлюваних ресурсів, утворенням відходів тощо. Важливо оцінити баланс цих протилежних ефектів – «екологічну ціну» утеплення – для вибору найбільш доцільних матеріалів і технологій.

В Україні для утеплення фасадів різних типів будівель (приватних житлових будинків, багатопо-

верхівок, громадських і комерційних споруд) традиційно застосовують три основні види матеріалів: мінеральну вату (переважно з базальтового волокна), пінопласт (спінений пінополістирол EPS) та екструдований пінополістирол (XPS). Кожен з них має свої технічні характеристики та сферу оптимального використання. Мінеральна вата цінується за негорючість, паропроникність та високі акустичні властивості, тому широко використовується в багатопверховому житловому і комерційному будівництві, де важлива пожежна безпека і «дихаючі» стіни. EPS-пінопласт є найбільш масовим утеплювачем у приватному секторі й при термомодернізації старих будівель завдяки низькій вартості та достатнім теплоізоляційним властивостям. XPS має вищу міцність і водостійкість, тому незамінний для утеплення цоколів, фундаментів, цокольних поверхів, а також плоских дахів – тобто там, де утеплювач контактує з ґрунтом чи водою і зазнає механічних навантажень. Правильне розуміння особливостей цих матеріалів дозволяє поєднувати їх переваги (наприклад, комбінування негорючих мінераловатних прошарків з пінополістирольними плитами) для оптимального результату. Водночас вибір утеплювача має враховувати не лише технічні та економічні параметри, а й екологічні наслідки на всіх стадіях його життєвого циклу.

Актуальність дослідження. Актуальність статті зумовлена необхідністю екологічно обґрунтованого вибору теплоізоляційних матеріалів для зовнішнього утеплення будівель в Україні, що є ключовим чинником досягнення значного скорочення енергоспоживання та викидів парникових газів у процесі термомодернізації житлового фонду.

Метою роботи є порівняльна оцінка життєвого циклу трьох основних теплоізоляційних матеріалів (базальтової мінеральної вати, EPS і XPS) для визначення екологічного ефекту при термомодернізації житлового фонду.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання: 1) зібрати, узагальнити та проаналізувати актуальні дані про впливи на довкілля в процесі виробництва, транспортування, експлуатації та утилізації зазначених матеріалів; 2) оцінити для кожного матеріалу показники впливу на довкілля за основними категоріями (парникові гази, енергоспоживання, кислотифікація, озонове виснаження, смог, евтрофікація, токсичність); 3) порівняти екологічні наслідки життєвих циклів матеріалів та виявити їхні переваги й недоліки; 4) сформулювати рекомендації щодо вибору утеплювача з позицій екологічної доцільності, враховуючи зменшення викидів CO₂ протягом експлуатації будівлі для врахування в процесі оцінки екологічного ефекту при термомодернізації житлового фонду.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Енергоефективність будівельного сектору є одним

із ключових пріоритетів розвитку України, що відображено у національних законах і програмах. Зокрема, ухвалення Закону України «Про енергетичну ефективність» [3] було спрямоване на виконання міжнародних зобов'язань із впровадження енергоощадних заходів відповідно до стандартів ЄС та Угоди про асоціацію з ЄС. Також Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [4] націлений на зменшення енергоспоживання у будівлях, підвищення рівня їх енергоефективності та адаптацію до європейських стандартів. Його основним завданням є створення умов для ефективного використання енергії, скорочення витрат на її споживання та зниження негативного впливу на довкілля. Відповідно до цих цілей, у лютому 2025 р. Міністерство розвитку громад та територій України Наказом № 168 запровадило обов'язкові вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії (NZEB) [5], які передбачають високий клас енергоефективності, обмежене використання викопних видів палива, значну частку відновлюваної енергії, а головне – якісну теплоізоляцію огорожувальних конструкцій [6]. Впровадження стандарту NZEB у новому будівництві та при реновації існуючих будівель розглядається як один із вирішальних кроків для підвищення енергетичної незалежності держави та зменшення негативного екологічного впливу внаслідок скорочення споживання викопного палива. Це також є важливою складовою виконання зобов'язань України в межах інтеграції до європейського регуляторного простору [7].

Авторське дослідження з оцінки життєвого циклу теплоізоляційних матеріалів (мінеральна вата, EPS, XPS) безпосередньо узгоджується з зазначеними науковими та практичними пріоритетами. Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 р. визначає перехід до моделі низьковуглецевого зростання, що передбачає зменшення викидів парникових газів і мінімізацію використання викопного палива у всіх секторах економіки [8]. Для досягнення цих цілей Уряд схвалив Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 р. [9], який встановлює національну мету скоротити первинне енергоспоживання на 22,3%, кінцеве споживання – на 17,1%, а також зменшити викиди парникових газів на 56,6 млн т [10]. В межах кліматичних зобов'язань за Паризькою угодою Україна оновила Національно визначений внесок, взявши курс на скорочення викидів парникових газів на 65% до 2030 р. від рівня 1990 р. [11]. Досягнення таких амбітних цілей неможливе без масштабної термомодернізації будівель, що прямо зазначено у національних планах дій з виконання Паризької угоди (пріоритетне впровадження енергоефективних заходів та теплоізоляції будівель) [11]. Отже, оцінювання повного життєвого циклу утеплювачів набуває особливої актуальності: воно дозволяє визначити екологічні переваги та можливі впливи від застосування мінеральної вати,

EPS та XPS на всіх етапах – від виробництва до утилізації. Результати такої оцінки сприятимуть обґрунтуванню вибору оптимальних матеріалів для термомодернізації, що забезпечить виконання державних енергоефективних програм і кліматичних зобов'язань України на засадах сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метод оцінки життєвого циклу (Life Cycle Assessment, (LCA)) є загально визнаним інструментом кількісного вимірювання сукупного впливу будівельних матеріалів і технологій на довкілля за весь період їх існування. Стандартизована методологія LCA визначена міжнародними стандартами ISO 14040:2006 та ISO 14044:2006. Низка сучасних досліджень присвячена LCA теплоізоляційних матеріалів та систем утеплення будівель. Так, огляд літератури [12] показав, що традиційні утеплювачі (мінеральна вата, скловата, EPS) мають, загалом, співставні показники екологічного впливу, тоді як екструдований пінополістирол та пінополіуретан часто демонструють дещо вищі інтегральні впливи через енергоємність виробництва та вміст хімічних агентів [13]. Зокрема, XPS історично характеризувався підвищеним вуглецевим слідом порівняно з іншими утеплювачами через використання фторовмісних спінювачів із високим GWP та значні енерговитрати на екструзію. Водночас пінополістирол EPS у низці джерел названий одним із найбільш екологічно ефективних утеплювачів: за рівних умов він має низькі показники впливу на зміну клімату, озоновий шар, кислотність тощо. Так, у дослідженні польських учених [14] порівнювались дві системи утеплення фасаду (ETICS) – на основі EPS та на основі мінеральної вати, й було виявлено, що сумарні екологічні навантаження у варіанті з мінеральною ватою вищі за всіма аналізованими категоріями; зокрема, *global warming potential* системи MW виявився майже вдвічі більшим, ніж в еквівалентній системі з EPS. Комплексний огляд 156 екологічних декларацій матеріалів [15] підтверджує конкурентні показники традиційних мінеральних утеплювачів і пінополістиролу: їх втілена енергія та вуглецевий слід значно нижчі, ніж у новітніх матеріалів типу аерогелів, і знаходяться в співставних межах варіювання між собою. В інших роботах відзначено, що хоча кам'яна та скловата потребують суттєвих енерговитрат на виробництво (плавлення сировини при 1300–1500 °C) і теж містять невідновлювані компоненти (органічні сполучні, кокс як паливо тощо), полістирольні утеплювачі додатково споживають нафтохімічну сировину та потенційно можуть виділяти леткі органічні сполуки (пентан) на стадії виробництва [13]. Таким чином, однозначної відповіді щодо найекологічнішого матеріалу немає – усе залежить від пріоритетних категорій впливу та умов експлуатації. Екологічні переваги від утеплення (скорочення викидів за рахунок енергоощадності) багаторазово переважають *інвестиційні впливи* від виробництва утеплювачів [16]. Для

обґрунтованого вибору матеріалів у конкретних проєктах потрібен детальний аналіз їх життєвого циклу з урахуванням локальних кліматичних умов, стану ринку енергоносіїв та утеплювачів, наявних технологій та потужностей утилізації відходів на завершальній стадії життєвого циклу. Саме такий аналіз проведено у представленій роботі.

Викладення основного матеріалу.

Вплив виробництва (стадія A1–A3). На етапі виготовлення утеплювачів найбільше навантаження на довкілля припадає на споживання енергії та сировини. Розрахунки показали, що з трьох матеріалів найменший сумарний вплив при виробництві має EPS-пінопласт. Його виробництво потребує ~80 МДж невідновлюваної енергії на 1 м² утеплення (100 мм) і супроводжується емісією ~5,5–6 кг CO₂-екв. парникових газів. Для порівняння, мінеральна вата має вищі енерговитрати (~120 МДж/м²) через енергію плавлення базальту та випалу коксуючого палива. Викиди GHG при цьому складають ~7 кг CO₂-екв/м². XPS виявився найбільш «вуглецеємним» – на його виробництво витрачається близько 170–180 МДж/м², а GWP досягає ~8–9 кг CO₂-екв. на 1 м². Раніше, коли XPS виготовляли з фреоновими спінювачами, цей показник був ще вищим. Перехід на нові низькопотенційні агенти (наприклад, HFO-1234ze) істотно знизив парниковий вплив XPS, але все ж не вивів його на рівень EPS. Отже, з погляду *втілених парникових викидів* виробничої стадії лідирує EPS, за ним – мінеральна вата, а XPS поки що аутсайдер. Цей висновок узгоджується з літературними даними: за умови однакового опору теплопровідності (R) пінополістирол має один із найнижчих GWP серед популярних утеплювачів. Наприклад, у [17] наводять, що виробництво 1 м³ EPS пов'язане з емісією ~55 кг CO₂-екв., тоді як 1 м³ кам'яної вати – ~80 кг CO₂-екв. (за рахунок енергії плавлення).

В інших категоріях впливу картина аналогічна: енергоємність виробництва найнижча в EPS, трохи вища у мінеральної вати (попри майже невичерпну мінеральну сировину, витрати енергії на плавлення великі) і найвища у XPS. Використання сировини: EPS та XPS виробляються з нафтопродуктів (полістирольні гранули, пентан, HFC/HFO), тобто споживають обмежені викопні ресурси. Мінеральна вата виготовляється з базальту – поширеної гірської породи, фактично відновлюваної у масштабі земної кори. З цього погляду вата виглядає привабливіше, хоча слід пам'ятати, що й вона опосередковано «витрачає» нафту і газ – як паливо для печей.

Кислотифікація і смог: мінеральна вата, через процеси плавлення (викиди SO₂, NO_x при згорянні коксу), дещо більше спричиняє потенціал кислотних дощів – близько 0,03–0,04 кг SO₂-екв. на 1 м². У EPS цей показник трохи нижчий (~0,02 кг), у XPS – близько ~0,03 кг SO₂-екв. (на рівні вати). Внесок у фотохімічне утворення озону (смог) в EPS найвідчутніший серед трійки через випаровування

пентану при спіненні гранул; оцінений РОСР для EPS ~5–8 г етилен-екв. на 1 м², тоді як для XPS і вати – ~2–3 г. Цей ефект від пентану є локальним і короткочасним, тож великої екологічної загрози не становить. Озоновий потенціал ODP приблизно нульовий для всіх трьох матеріалів (сучасні технології не застосовують озоноруйнівних речовин). Виняток – старі XPS, які спінювались фреоном HCFC-142b. Таким чином, у категоріях кислотності, смогу та озону суттєвих відмінностей між матеріалами немає або вони не критичні для вибору (абсолютні величини впливів невеликі).

Транспортування та монтаж (A4–A5).

Впливи цього етапу значно менші за виробничі, проте тут проявляються свої нюанси. Основний фактор – різниця у щільності та масі матеріалів. Легкий EPS (щільність 15–20 кг/м³) є найвигіднішим щодо перевезення: в перерахунку на 1 м² утеплення його маса ~1,5–2 кг, тоді як у базальтової вати (щільність ~100 кг/м³) маса шару ~10 кг. Отже, перевезення мінеральної вати дає у 5–7 разів більше викидів CO₂ на 1 км, ніж пінопласту, за однакового об'єму матеріалу. Для XPS (щільність 30–35 кг/м³) транспортні показники середні, близькі до EPS. На монтажній стадії прямі впливи мінімальні: всі матеріали встановлюються вручну, не потребуючи додаткової енергії чи води. Відходи обрізків (2–5%) вже враховано у виробничих показниках. Втім, екологічні ризики при монтажі пов'язані з безпекою: легкі крихти пінопласту можуть розлітатися навколо та стати джерелом сміття (пластикові гранули в ґрунті), а мінераловатний пил та волокна становлять небезпеку при вдиханні для робітників. Тому важливо проводити такі роботи дуже обережно. За належної культури будівництва відмінності між матеріалами на цій стадії нівелюються.

Фаза експлуатації (B1–B7). Утеплювач під час використання виконує пасивну функцію теплозахисного шару. Прямі екологічні впливи тут мізерні: матеріали не споживають енергії, не виділяють суттєвих забруднень протягом десятиліть. Основні питання – довговічність та збереження теплоізоляційних властивостей з часом, а також можливість повторного використання матеріалу. Дослідження показують, що всі три розглянуті утеплювачі здатні прослужити щонайменше 50–60 років без втрати ефективності за умови правильного монтажу й експлуатації. Мінеральна вата потенційно може деградувати від вологи, тож її потрібно захищати від протікань. EPS і XPS з часом можуть трохи підвищити теплопровідність через дифузію газу з комірок (у XPS це триваліше, тому він вважається найбільш довговічним – може зберігати функцію більше ніж 75 років). Загалом, протягом нормативних 60 років різниця в термічній ефективності між матеріалами несуттєва. Жоден матеріал у цьому проміжку часу не вимагатиме заміни, отже не створюватиме додаткових навантажень виробництва. Головний пози-

тивний екологічний внесок фази В – це економія енергії опалення та кондиціонування будівлі завдяки утепленню, що критично важливо для загального балансу. У розрахунку на 1 м² фасаду утеплення за 60 років може запобігти викидам 150–300 кг CO₂ (залежно від типу будівлі, палива і клімату), тоді як втілені емісії від матеріалу становлять лише 5–9 кг CO₂. Тобто загальний виграш у 20–50 разів перевищує інвестиційний «вуглецевий борг» утеплювача. Звідсіля витікає, що середній строк окупності вуглецевих витрат на утеплення складає менше одного року для більшості матеріалів; навіть для «найважчої» мінераловатної плити цей період вимірюється місяцями, що підтверджується висновками інших досліджень [16]. Таким чином, з погляду повного життєвого циклу, екологічна доцільність утеплення будівель є беззаперечною, а відмінності між матеріалами набувають значення переважно щодо *довгострокових ризиків*. Серед таких відмінностей можна відзначити пожежну безпеку. Мінеральна вата є негорючою (Євроклас A1), тоді як EPS і XPS належать до горючих матеріалів (Г1–Г4 залежно від добавок). У разі займання пінополістирольний утеплювач може виділяти густий токсичний дим (стирол, бензол, сажа та інші продукти горіння), що спричиняє сильне локальне забруднення повітря. Ймовірність пожежі невелика і за межами стандартного LCA, але цей фактор варто враховувати при виборі матеріалу для високих будівель чи будинків з підвищеною пожежною небезпекою – там доцільна мінеральна вата. Щодо біологічної стійкості – EPS/XPS не піддаються біорозкладанню: в них не заводиться пліснява чи грибок (плюс – не спричиняють викидів метану), але й після використання вони не розкладаються століттями. Мінеральна вата інертна і не є поживним середовищем для біоорганізмів; сучасні біорозчинні різновиди не становлять небезпеки для здоров'я мешканців.

Демонтаж та утилізація (C1–C4, D).

Наприкінці життєвого циклу утеплювач демонтується під час капремонту чи знесення будинку. Актуальною проблемою є поводження з великими обсягами відпрацьованих теплоізоляційних матеріалів, які після 30–60 років експлуатації потрапляють у сферу поводження з відходами. Наразі в Україні практично весь такий демонтований утеплювач опиняється на сміттєзвалищах (полігонах ТПВ) разом з будівельним ломом. Аналіз показує, що мінеральна вата при захороненні є найменш проблемною: вона інертна, хімічно стабільна, не виділяє токсичних речовин у ґрунт чи повітря. Її головний вплив – зайняття певного об'єму полігону (мінеральна вата займає значне місце, хоча з часом може ущільнюватися). Полістирольні утеплювачі створюють складнішу ситуацію. EPS та XPS практично не розкладаються у ґрунті, їх фрагменти можуть століттями зберігатися у товщі відходів. При цьому під

дією сонця та механічних навантажень пінопластові плити кришаться на дрібні частки, перетворюючись на *мікропластик*, що може вимиватися дощовими водами й потрапляти у навколишнє середовище. Крім того, у складі старого EPS/XPS, виготовленого до середини 2010-х років, майже гарантовано присутній антипірен HBCD (гексабромциклододекан) – до 0,5% маси. Ця речовина, яку колись додавали для самозатухання пінопласту, зараз визнана небезпечною: вона не розкладається, накопичується в живих організмах, токсична для водної біоти. З 2013 р. HBCD включено до Стокгольмської конвенції як стійкий органічний забруднювач, його використання обмежено, але величезна кількість пінопласту з HBCD досі експлуатується в будівлях і згодом стане відходами. Таким чином, якщо просто складувати старий пінополістирол на звалищі, існує ризик поступового вилугування HBCD та інших домішок у довкілля. З огляду на це, оптимальною стратегією утилізації EPS/XPS є контрольоване спалювання з рекуперацією енергії. При спалюванні при високій температурі полістирол повністю розкладається до CO_2 і H_2O , а теплота згоряння (~35 МДж/кг) може бути використана як енергія. Сучасні сміттєспалювальні заводи необхідно оснащувати фільтрами, що вловлюють небезпечні гази (HBr, стирол, сажа), щоб емісії при утилізації мінімізувалися. За розрахунками, енергетичне використання відходів EPS/XPS дозволяє повернути до 30–40% первинної енергії та зменшити їх сумарний GWP приблизно на третину. У сценарії повного спалення полістирольні утеплювачі мають шанс наблизитися за показником «життєвого» CO_2 , навіть, до мінеральної вати. На жаль, в Україні потужностей для спалення відходів практично немає, тому реалістичним лишається сценарій полігонного захоронення. За таких умов мінеральна вата виглядає екологічно безпечнішою на стадії кінця життя, оскільки не генерує довготривалих забрудників і не класифікується як небезпечні

відходи. Старий пінопласт, навпаки, офіційно відносять до категорії небезпечних відходів – його бажано ізолювати від загальної маси ТПВ і не допускати вивітрювання.

Зведені кількісні показники впливів для 1 м² утеплювача товщиною 100 мм (за умов виробництва в Європі, транспортування на 100 км, експлуатації 60 років та захоронення на полігоні) наведені в табл. 1.

Як видно з табл. 1, EPS має найнижчі показники у більшості категорій впливу (GWP, ODP, AP, первинна енергія). Мінеральна вата близька до EPS за GWP та ODP, проте програє за енергоємністю і дещо перевищує по кислотифікації, маючи водночас найменший внесок у смог та евтрофікацію. XPS без застосування технологій утилізації виглядає найгірше за інтегральним екологічним навантаженням: у нього найвищі GWP та PE, показники AP і РОСР на рівні з іншими або трохи гірші, а EP – найвища серед трьох матеріалів. Втім, слід зазначити, що застосування XPS часто дозволяє зменшити товщину утеплення, отже, менше матеріалу використовується на ту ж теплоізоляцію. Крім того, впровадження спалення з рекуперацією енергії суттєво покращує сумарний профіль XPS та EPS: принаймні за GWP вони можуть наблизитися до показників вати або й перевершити їх.

Техніко-екологічні переваги та недоліки утеплювачів. На основі проведеного аналізу можна узагальнити сильні та слабкі сторони кожного матеріалу з екологічної точки зору.

Базальтова мінвата: основні плюси – негорючість (пожежна безпека), паропроникність (стіни «дихають»), відсутність органічних шкідливих добавок, інертність відходів; мінуси – високі витрати енергії при виробництві (плавлення при 1400 °C), що тягне підвищений вуглецевий слід і кислотні викиди; велика вага (транспортні емісії); волокнисті відходи можуть подразнювати дихальні шляхи; теплопровід-

Таблиця 1

Ключові показники екологічного впливу 1 м² утеплювача товщиною 100 мм

Категорія впливу (функціональна одиниця)	Мінеральна вата	EPS (пінополістирол)	XPS (екструдований пінополістирол)
GWP – Потенціал глобального потепління (кг CO_2 -екв.)	~7,0	~5,5–6,0	~8,0–9,0
ODP – Озоноруйнівний потенціал (кг CFC-11-екв.)	≈ 0	≈ 0	≈ 0 (нові марки) до 1×10^{-6} (старі)
AP – Кислотифікація (кг SO_2 -екв.)	~0,020–0,040	~0,015–0,030	~0,030–0,035
EP – Евтрофікація (кг PO_4^{3-} -екв.)	~0,005	~0,010	~0,020
РОСР – Смог (г NMVOC-екв.)	~2	~5–8	~2–3
PE (невідновлювана) – Первинна енергія (МДж)	~120	~80	~180
ETP (water) – Екотоксичність (умовні бали)	дуже низька	середня (HBCD*)	найвища (HBCD*, HFC*)

Примітка: HBCD – гексабромциклододекан, токсичний антипірен, заборонений із 2015 р. (наявний в старих марках EPS/XPS); HFC – фторовмісні спінювачі з високим GWP (використовувались у старих XPS).

ність дещо вища, тобто треба трохи більша товщина для того ж опору теплопровідності R.

Пінопласт EPS: переваги – найнижчі впливи на клімат і витрати енергії, низька щільність (дешево транспортування), зручний монтаж без пилу, дуже низьке водопоглинання (не боїться вологи). Також це найдешевший утеплювач на ринку, що побічно свідчить про меншу матеріало- та енергоємність його виробництва. Недоліки EPS: горючість (не можна застосовувати без протипожежних розривів на високих будинках), виділення пентану при виробництві (фотохімічний смог), проблеми з відходами – *пластикове забруднення*, наявність HBCD у старих зразках, необхідність контролювати утилізацію як небезпечного відходу.

Екструдований XPS: плюси – найкращі теплоізоляційні властивості (на 10–20% ефективніше за EPS при рівній товщині), висока міцність на стиск (не ламається, не просідає), дуже низьке водопоглинання (можна застосовувати у вологих середовищах без втрати властивостей). Мінуси XPS: найдорожчий у виробництві, більша емісія CO₂, витрати енергії; горючий, при горінні виділяє токсичні гази; в старих марках містить найбільше HBCD; відходи XPS практично не піддаються подрібненню і повторному використанню (їх можна лише спалити або захоронити).

Головні висновки.

1. Екологічна ефективність утеплення.

Незалежно від обраного матеріалу, зовнішнє утеплення фасадів є екологічно доцільним заходом. За 60 років експлуатації утеплення дозволяє скоротити викиди CO₂ на порядок більше, ніж було викинуто при виробництві утеплювача. Вуглецевий «термін окупності» вкладеної енергії й емісій для теплоізоляції становить від кількох місяців до 2–3 років залежно від матеріалу і клімату. Таким чином, позитивний ефект утеплення (зменшення експлуатаційних викидів) значно переважає негативний (вплив від виробництва, монтажу та утилізації). Це слід враховувати в політиці енергомодернізації: екологічні витрати на виробництво утеплювачів не є перешкодою для термомодернізації будівель, а навпаки швидко компенсуються внаслідок економії палива.

2. Порівняння матеріалів (LCA-висновки).

Комплексна LCA-оцінка базальтової вати, EPS та XPS виявила суттєві відмінності у їхніх впливах на довкілля. Загалом найкращий екологічний профіль продемонстрував пінополістирол EPS: на одиницю теплоізоляції він має найнижчий вуглецевий слід і найменше сумарне невідновлюване енергоспоживання. EPS також відзначився найнижчими або близькими до найнижчих показниками в категоріях кислотності та озонного виснаження. Мінеральна вата посіла друге місце: її виробництво ресурсно місткіше та дещо більш «вуглецеве», проте мінеральна вата має свої екологічні переваги – негорю-

чість, відсутність летких органічних сполук і пластмас у складі, інертні відходи. XPS наразі є найменш екологічно вигідним із розглянутих матеріалів – більші питомі викиди парникових газів, велике споживання енергії, наявність фторовуглецевих газів і HBCD в старих зразках. Проте, завдяки кращій теплоізоляції та довговічності, XPS має свою нішу застосування; новітні технології дещо покращили його екологічні показники, наблизивши до рівня мінеральної вати.

3. Рекомендації з урахуванням повного циклу.

З екологічної точки зору для масового утеплення житлових і громадських будівель варто надавати перевагу матеріалам з найменшим *життєвим* вуглецевим слідом та енергоємністю – в сучасних умовах це пінополістирол EPS. Він забезпечує необхідну термоізоляцію з мінімальними емісіями парникових газів протягом циклу і мінімальними затратами невідновлюваних ресурсів. Для висотних та інших об'єктів з підвищеними вимогами пожежної безпеки варто використовувати базальтову мінеральну вату, як менш горючу та хімічно інертну, попри трохи більший вуглецевий слід. Застосування XPS слід обмежувати тими ділянками, де особливо потрібні його властивості – міцність і водостійкість (фундаменти, цоколі, підземні споруди, інверсійні дахи тощо). В інших випадках його екологічна доцільність менша з огляду на складність утилізації й більші виробничі впливи. Жоден із матеріалів не є ідеальним, тому перспективним напрямом є розвиток технологій переробки утеплювачів (рециклінг і повторне використання пінополістиролу, повернення відходів мінеральної вати на виробництво тощо) та пошук альтернативних ізоляційних продуктів з меншою сумарною шкодою (наприклад, натуральні волокнисті утеплювачі, матеріали з відходів виробництва та ін.). При виборі системи утеплення на практиці слід враховувати не лише результати LCA, а й експлуатаційні вимоги – довговічність, стійкість до вологи, пожежну безпеку, сумісність з конструкцією будівлі та економічну доцільність.

Впровадження комплексного показника екологічного впливу утеплювачів на державному рівні могло б стати корисним інструментом для стимулювання сталого будівництва. Отримані в роботі висновки узгоджуються з результатами інших незалежних досліджень та оглядів, які вказують на лідерство EPS за екологічними показниками серед традиційних утеплювачів (за умови відповідального поводження з відходами).

Перспективи використання результатів досліджень. Результати дослідження можуть бути використані органами виконавчої влади та фахівцями у галузі будівництва для вирішення питань оцінки впливу на довкілля в процесі термомодернізації будівель на території України.

Література

1. Amani N. Energy efficiency of residential buildings using thermal insulation of external walls and roof based on simulation analysis. *Energy Storage and Saving*. 2024. Vol. 4, no. 1. pp. 48–55. DOI:10.1016/j.enss.2024.11.006
2. Fedorczak-Cisak, M., Bomberg, M., Yarbrough, D.W., Lingo, L.E., Romanska-Zapala, A. Position Paper Introducing a Sustainable, Universal Approach to Retrofitting Residential Buildings. *Buildings*. 2022. 12(6), 846. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings12060846>
3. Закон України «Про енергетичну ефективність». *Відомості Верховної Ради України*. 2022. № 2. Ст. 8. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
4. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель». *Відомості Верховної Ради України*. 2017. № 33. Ст. 359. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
5. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 06.02.2025 р. № 168. *Офіційний вісник України*. 2025 р. № 26. Ст. 1750. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
6. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності). URL: <https://saee.gov.ua/> (дата звернення: 17.06.2025)
7. Re: House – Відновлення будинків. URL: <https://rehouse.org.ua/> (дата звернення: 17.06.2025)
8. Український центр економічних та політичних досліджень ім. О. Разумкова. URL: <https://razumkov.org.ua/> (дата звернення: 17.06.2025)
9. Про Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.12.2021 р. № 1803-р. *Офіційний вісник України*. 2022 р. № 8. Ст. 439. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1803-2021-%D1%80#Text> (дата звернення: 20.06.2025)
10. International Foundation of Development. URL: <https://in-fd.com/> (дата звернення: 25.06.2025)
11. United Nations Ukraine. URL: <https://ukraine.un.org/> (дата звернення: 25.06.2025)
12. Schiavoni, S. & D'Alessandro, F. & Bianchi, F. & Asdrubali, F., 2016. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*. 2016. Vol. 62(C). pp. 988-1011. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
13. Rocha, B. M., Tenório, M., Branco, J. M., Silva, S. M. A Comprehensive Comparison of Insulation Materials for Timber Building Systems. *Energies*. 2025. 18(10), 2420. URL: <https://doi.org/10.3390/en18102420>
14. Michalak J., Czernik S., Marcinek M., Michalowski B. Environmental burdens of External Thermal Insulation Systems. Expanded Polystyrene vs. Mineral Wool: Case Study from Poland. *Sustainability*. 2020. 12(11): 4532. DOI: 10.3390/su12114532.
15. Grazieschi G., Asdrubali F., Thomas G. Embodied energy and carbon of building insulating materials: A critical review. *Cleaner Environmental Systems*. 2021. 2: 100032. DOI: 10.1016/j.cesys.2021.100032.
16. Setting the Record Straight: Insulation and Low Carbon Buildings. URL: [https://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2024/10/N170-Insulation-Low-Carbon-Buildings-1024.pdf#:~:text=\(дата звернення: 20.06.2025\)](https://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2024/10/N170-Insulation-Low-Carbon-Buildings-1024.pdf#:~:text=(дата звернення: 20.06.2025))
17. Gomes, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2020). Environmental, economic and energy life cycle assessment “from cradle to cradle” (3E-C2C) of flat roofs. *Journal of Building Engineering*, 32. Article 101436. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.101436>

Дата першого надходження рукопису до видання: 07.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ФІТОЦЕНОТИЧНЕ РІЗНОМАНІТТЯ В РАЙОНІ ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ М. КОРОСТЕНЬ

Хом'як І.В., Василенко О.М.

Житомирський державний університет імені Івана Франка
вул. Велика Бердичівська, 40, 10008, м. Житомир
ecosystem_lab@ukr.net

Публікація присвячена вивченню різноманітності рослинних угруповань санітарно-захисної зони звалища твердих відходів міста Коростеня. Дослідження проводилося в рамках наукових консультацій компанії ТОВ «Баланс Еко». Консультації передбачали проведення післяпроектного моніторингу впливу звалища твердих відходів міста Коростеня на оселищене та біотичне різноманіття. Уперше було класифіковано рослинні угруповання в межах санітарно-захисної зони сміттєзвалища за класифікацією Браун Бланке. Було встановлено фітоценотичну різноманітність рослинності досліджуваної території та співвідношення між природними та синантропними фітоценозами. Метою дослідження є встановлення фітоценотичного різноманіття території полігону твердих побутових відходів м. Коростень. Відповідно до мети було поставлено такі завдання: класифікувати рослинність в межах санітарно-захисної зони полігону твердих побутових відходів м. Коростень за методом Браун Бланке; визначити фітоценотичне різноманіття рослинних угруповань санітарно-захисної зони полігону твердих побутових відходів м. Коростень. Матеріалами досліджень є стандартні геоботанічні описи, виконані в межах санітарно-захисної зони полігону твердих побутових відходів м. Коростень з 2023 до 2025 рр. У результаті дослідження встановлено що рослинність досліджуваної території включає в себе 17 класів, 25 порядків, 33 союзи та 57 асоціацій. Найвище фітоценотичне різноманіття на досліджуваній території характерне для класів *Molinio-Arrhenatheretea* (17,9%), *Artemisietea vulgaris* (17,9%), *Stellarietea mediae* (12,5%) та *Phragmiti-Magnocaricetea* (10,7%). Найнижчі показники фітоценотичного різноманіття (1,8) характерні для класів *Lemnetea*, *Trifolio-Geranietea*, *Sedo-Scleranthetetea*, *Nardetea strictae*, *Quercetea robori-petraeae*, *Alnetea glutinosae* та *Franguletea*. *Ключові слова*: Рослинність, антропогенні ландшафти, синтаксони, антропогенна трансформація.

Phytocenotic diversity in the area of the solid waste landfill of the Korosten. Khomiak I., Vasylenko O.

The publication is devoted to the study of the diversity of plant communities of the sanitary protection zone of the solid waste landfill of the city of Korosten. The study was conducted within the framework of scientific consultations of the company Balance Eco LLC. The consultations provided for post-project monitoring of the impact of the solid waste landfill of the city of Korosten on habitat and biotic diversity. For the first time, plant communities within the sanitary protection zone of the landfill were classified according to the Brown Blanke classification. The phytocenotic diversity of the vegetation of the studied territory was established and consists of natural and synanthropic phytocenoses. The method of research is the installation of phytocenotic diversity of the territory of the solid waste landfill of the city of Korosten. Then the following task was set for the purpose: to classify vegetation within the sanitary protection zone of the solid waste landfill of the city of Korosten according to the Brown Blanke method; application phytocenotic diversity of plant communities of the sanitary protection zone of the solid waste landfill. Korosten. The materials of the study are standard geobotanical descriptions made within the sanitary protection zone of the solid waste landfill. Korosten from 2023 to 2025. As a result of the study, it was found that the vegetation of the studied area includes 17 classes, 25 orders, 33 unions, and 57 associations. The greatest phytocenotic diversity in the studied area is characteristic of the classes *Molinio-Arrhenatheretea* (17.9%), *Artemisietea vulgaris* (17.9%), *Stellarietea mediae* (12.5%), and *Phragmiti-Magnocaricetea* (10.7%). The lowest phytocenotic diversity indices (1.8) are characteristic of the classes *Lemnetea*, *Trifolio-Geranietea*, *Sedo-Scleranthetetea*, *Nardetea strictae*, *Quercetea robori-petraeae*, *Alnetea glutinosae*, and *Franguletea*. *Key words*: vegetation, anthropogenic landscapes, syntaxons, nthropogenic transformation.

Постановка проблеми. Антропогенна трансформація компонентів біосфери є складною теоретичною та практичною проблемою, незважаючи на те що цій тематиці присвячено багато уваги з середини ХХ століття. Причини складнощів прогнозування наслідків антропогенної трансформації мають кілька першоджерел. По перше, сам антропогенний фактор є дуже багатограним та включає в себе велику кількість різнопланової діяльності, що ускладнює узагальнення його дії на довкілля. По друге, він дуже мінливий і з часом отримує все нові і нові компоненти. І по третє, існує упереджене узагальнення про антропогенний вплив на біоту, яке не підтверджується емпіричним досвідом спостережень [1].

Актуальність дослідження. На сьогодні ми спостерігаємо декілька важливих процесів у навко-

лишньому середовищі, пов'язаних із його антропогенною трансформацією. По перше, зростає площа антропогенно трансформованих територій та глибина їхнього перетворення. Залишається все менше куточків первозданної дикої природи із унікальним біорізноманіттям. Із іншого боку, відбувається синатропізація біоти, яка адаптується до життя у змінених людиною умовах [2]. Це стосується і раритетної біоти, яка потребує особливого моніторингу та охорони. І нарешті, нові комп'ютерні технології в поєднанні із розвитком теорії екосистем відкривають нові можливості об'єктивної оцінки та прогнозування впливів людини на довкілля. Це робить дослідження конкретних антропогенно змінених територій актуальною екологічною задачею.

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

Дослідження проводилося в рамках наукових консультацій компанії ТОВ «Баланс Еко». Консультації передбачали проведення післяпроектного моніторингу впливу звалища твердих відходів міста Коростеня на оселищене та біотичне різноманіття [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Останні десятиліття антропогенна трансформація рослинності знаходиться в центрі уваги багатьох дослідників. Вони відмічають наявність кількох процесів, які її супроводжують. З одного боку, відбувається витіснення агемеробних та олігогемеробних угруповань із місць підвищеної активності людини. З іншого боку, в межах видів з'являються антропо-толерантні популяції. При цьому, використовуються різноманітні механізми адаптації до підвищеної антропогенної трансформації. Серед них, використання генетичних механізмів пристосування до антропогенного тиску. Наприклад, через збільшення плодючості [4].

Видовий рівень адаптації має потенціал для переходу на ценотичний. Однак, на практиці цього не відбувається. Рослинні угруповання, які традиційно відносимо до природних, у таких місцях містять у складі своєї флори значне число синантропних видів. Вони по суті є типологічними екотонами між природними та синантропними рослинними угрупованнями. Із усього об'єму проаналізованих описів, доступних у відкритому доступі, не виявлено тих які належать до номенклатурного типу.

Антропогенна трансформація екосистем в районі міських сміттєзвалищ досить специфічна. Вони є джерелом великої кількості нутрієнтів в тому числі елементів мінерального живлення. Це приваблює сюди велике число тварин, як представників синантропної фауни так і дикої [5]. Наприклад, на території Коростенського звалища ТПВ спостерігаємо найбільшу в регіоні популяцію лелеки білого (*Ciconia ciconia*) та мартина сизого (*Larus canus*). Переміщення побутових відходів та висока активність фауни в поєднанні із порушеннями ґрунтового покриву призводять не лише до формування рудеральної рослинності, а й до утворення угруповань, в яких домінують інвазійні види трансформери.

Новизна. Уперше було класифіковано рослинні угруповання в межах санітарно-захисної зони сміттєзвалища за класифікацією Браун Бланке. Було встановлено фітоценотичну різноманітність рослинності досліджуваної території та співвідношення між природними та синантропними фітоценозами.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження є важливим напрацюванням для розвитку теорії динаміки екосистем та в практичній діяльності, пов'язаній із встановлення наслідків впливу діяльності людини на довкілля.

Мета та завдання дослідження: Метою дослідження є встановлення фітоценотичного різнома-

ніття території полігону твердих побутових відходів м. Коростень. Відповідно до мети було поставлено такі завдання:

- Класифікувати рослинність в межах санітарно-захисної зони полігону твердих побутових відходів м. Коростень за методом Браун Бланке;
- Визначити фітоценотичне різноманіття рослинних угруповань санітарно-захисної зони полігону твердих побутових відходів м. Коростень.

Матеріал і методи дослідження.

Матеріалами досліджень є стандартні геоботанічні описи, виконані в межах санітарно-захисної зони полігону твердих побутових відходів м. Коростень з 2023 до 2025 рр. Описи виконані маршрутно-експедиційним й напівстаціонарним методами згідно стандартною методикою [6]. Геоботанічні описи було класифіковано згідно із традицією та методами швейцарсько-французької школи Браун Бланке [7] Для процедури класифікації використовувалася програма «Turboweg for Windows» [8]. Величину показників екологічних чинників встановлювали із використанням синфітоіндикаційних методів із використанням програмного комплексу «Simargl 1.12» [9].

Результати досліджень. Рослинність досліджуваної території включає в себе 17 класів, 25 порядків, 33 союзи та 57 асоціацій. Синтаксономічна схема рослинності класифікованої згідно із принципом Браун Бланке має такий вигляд:

Lemnetea de Bolós et Masclans 1955: Lemnetalia minoris de Bolós et Masclans 1955: Lemnion minoris de Bolós et Masclans 1955: Lemnetum minoris Soó 1927.

Phragmiti-Magnocaricetea Klika in Klika et Novak 1941: Nasturcio-Glycerietalia Pignatti 1953: Glycerio-Sparganion fluitans Br. -Bl et Siss in Boer 1942: Glycerietum fluitantis Nowiński 1930; Oenathetalia aquaticae Hejny ex Balátová-Tulácková et al. 1993: Eleocharito palustris-Sagittarion sagittifoliae Passarge 1964: Eleocharitetum palustris Savič 1926; Phragmitetalia Koch 1926: Phragmition Koch 1926: Phragmitetum australis Savič 1926, Typhetum angustifoliae Pignatti 1953, Typhetum latifoliae Nowiński 1930, Schoenoplectetum lacustris Chouard 1924, Glycerietum maximae Nowiński 1930 corr. Šumberová, Chytrý et Danihelka in Chytrý 2011.

Molinio-Arrhenatheretea R.Tx 1937: Galietalia veri Mirk. et Naum. 1986: Agrostion vinealis Sipaylova, Mirk., Shelyag et V.Sl. 1985: Koelerio-Agrostietum vinealis (Sipaylova et al. 1985) Shelyag et al. 1987, Agrostio vinealis-Calamagrostietum epigeioris (Shelyag et al. 1981) Shelyag, V.Sl. et Sipaylova 1985, Agrostietum vinealis-tenuis Shelyag et al. 1985, Carici praecoci-Alopecuretum pratensis Mirkin in Denisova et al. 1986, Poo angustifoliae-Arrhenatheretum elatiori Shevchyk et V.Sl. in Shevchyk et al., 1996, Bromopsidetum inermis Shvergunova et al. 1984, Potentillo argenteae-Poetum angustifoliae Solomakha 1996, Achillea submiefolium-Dactyletum glomeratae

Smetana, Derpoluk, Krasova 1997; Arrhenatheretalia elatioris Tüxen 1931: Cynosurion cristati Tx. 1947: Lolietum perennis Gams 1927; Molinetalia Koch. 1926: Deschampsion caespitosae Horvatic 1930: *Holcetum lanati* Issler 1934.

Nardetea strictae Rivas Goday et Borja Carbonell in Rivas Goday et Mayor López. 1966: Nardetalia Preis. 1950: Violion caninae Schwickerath 1944: Calluno-Nardetum Hrynec 1959.

Trifolio-Geranieta Th.Müll 1962: Origanetalia Th.Müll 1962: Geranion sanguinei Tüxen in Müller 1962: Geranio-Trifolietum alpestris Th.Müller 1962,

Sedo-Scleranthetetea Br. -Bl. 1955: Alysso alyssoidis-Sedetalia albi Moravec 1967: Alysso alyssoidis-Sedion Oberdorfer et Müller in Müller 1961: Sedo acri-Dianthetum hypanicii nova.

Epilobietea angustifolii Tx. et Preising ex von Rochow 1951: Galeopsio-Senecionetalia sylvatici Passarge 1981: Epilobion angustifolii Oberd. 1957: Rubetum idaei Gams 1927, Calamagrostietum epigii Juraszek 1928.

Robinieta Jurco ex Hadač et Sofron 1980: Cheledonio-Robinieta Jurco ex Hadač et Sofron 1980: Balloto nigrae-Robinion pseudoacaciae Hadač et Sofron 1980: Cheledonio-Pinetum sylvestris (Gorelov 1997) Davydov comb. nova prov., Chelidonio-Acerion negundo L. Ishbirdin et A. Ishbirdin 1991: Cheledonio-Aceratum negundi L. Ishbirdin et A. Ishbirdin 1991; Cheledonio-Robinion Hadač et Sofron in Chytrý 2013: Cheledonio-Robinietum Jurco 1963; Sambucetalia racemosae Oberd. ex Doing 1962: Sambuco-Salicion capreae Tx. et Neum et Oberd. 1957: Salicetum capreae Schreier 1955.

Vaccinio-Piceetea Br. -Bl. in Br. -Bl. et al. 1939. Pinetalia sylvestris Oberdorfer 1957: Dicrano-Pinion (Libbert 1933) Matuszkiewicz 1962: Cladonio-Pinetum Juraszek 1927, Dicrano-Pinetum Preising et Knapp ex Oberdorfer 1957.

Quercetea robori-petraeae Br. -Bl. et Tüxen ex Oberdorfer 1957: Quercetalia roboris R.Tx 1931: Pino-Quercion Medw. -Korn. 1959: Quercu roboris-Pinetum (W. Mat. 1981) J. Mat. 1988.

Salicetea purpurea Moor 1958: Salicetalia purpureae Moor 1958: Salicion albae de Soó 1951: Salicetum albae Issler 1926, Salici-Populetum Meijer Drees 1936, Populetum nigro-albae Slavnić 1952.

Alnetea glutinosae Br. -Bl. et Tüxen ex Westhoff, Dijk et al. 1946: Alnetalia glutinosae R.Tx 1937: Alnion glutinosae Malcuit 1929: Ribeso nigri-Alnetum Sol. -Gorn (1975) 1987.

Franguletea Doing ex Westhoff in Westhoff et Den Held 1969: Salicetalia auritae Doing 1962: Salicion cinerea Th.Müll et Görs ex Pass 1961: Salicetum pentandro-cinerea Pass 1961.

Artemisietea vulgaris Lohmeyer et al. ex von Rochow 1951: Agropyretalia intermedio-repentis Th.Müll et Görs 1969: Convolvulo-Agropyron repentis Görs 1966: Agropyretum repentis Felföldy 1942; Onopordetalia

acanthii Br. -Bl. et Tx. ex Klika et Hadač 1944: Arction lappae R.Tx 1937: Arctietum lappae Felföldy 1942, Arctio-Artemisietum vulgaris Oberd. Ex Seybold. et Th. Mull. 1972, Balloto-Malvetum sylvestris Gutte 1966, Leonuro-Arctietum Felföldy 1942, Echio-Verbascetum Sissingh 1950; Dauco-Melilotenion Görs ex Rostański et Gutte 1971: Berteroetum incanae Sissingh et Tideman ex Sissingh 1950, Dauco-Picridetum hieracioidis Görs 1966; Onopordion acanthii Br. -Bl et al. 1926: Balloto-Artemisietum absintii Schubert et Mahn 1959, Potentillo-Artemisietum absintii Faliński 1965, Tanaceto-Artemisietum vulgaris Br. -Bl (1931) 1949.

Stellarietea mediae R.Tx., Lohmaer et Preising 1950: Aperetalia spicae-venti J. Tx. & Tx. in Malato-Beliz et al. 1960: Scleranthion annui (Kruseman et Vlieger 1939) Sissingh in Westhoff et al. 1946: Centaureo-Aperetum spicae-venti V.Sl 1989, Violo arvensis-Centaureetum cyani Solomakha 1989, Aphano-Matricarietum R.Tx 1937; Galeopsion bifidae Abramova in Mirkin et al. 1985: Apero spicae-venti-Papaveretum rhoeadis Solomakha 1987; Atriplici-Chenopodietalia albi (Tx. 1937). Nordhagen 1940: Panico-Setarion Sissingh in Westhoff et al. 1946: Echinochloo-Setarietum Felföldy corr. 1942 Mucina in Mucina et al. 1993; Sisimbrietalia sophiae J.Tx. Görs 1966: Atriplicion Passarge 1978: Hordeion murini Br. -Bl. in Br. -Bl. et al. 1936: Brometum tectorum Bojko 1934, Hordeetum murini Libbert 1932.

Polygono arenastri-Poëtea annuae Rivas-Martínez 1975: Polygono arenastri-Poëetalia annuae Tx. in Géhu et al. 1972 corr. Rivas Martínez et al. 1991: Saginion procumbentis Tüxen et Ohba in Géhu et al. 1972: Herniarietum glabrae (Hohenester 1960) Hejný et Jehlík 1975, Poetum annuae Gams 1927.

Plantagenetea majoris Tx. et Preising ex von Rochow 1951: Potentillo-Polygonetalia avicularis R. Tx. 1947: Plantagini-Prunellion Eliáš 1980: Agrostio tenuis-Poetum annuae Gutte et Hilbig 1975, Juncetum tenuis Schwick. 1944; Potentillion anserinae Tüxen 1947: Ranunculo-Alopecuretum geniculati R.Tx 1937, Blysmo-Juncetum compressi (Libb. 1930) R.Tx. 1950.

Найвище фітоценотичне різноманіття на досліджуваній території характерне для класів Molinio-Arrhenatheretea та Artemisietea vulgaris (17,9%). Перша представляє перелоги та прибережні луки, розташовані навколо штучних водойм. Друга представляє різноманітні рудеральні угруповання, які сформувалися в наслідок антропогенної трансформації природних екосистем. Дещо нижчу різноманітність мають угруповання класу Stellarietea mediae (12,5%). Вони зустрічаються, як на території орної землі сільськогосподарських угідь, розташованих у межах санітарно-захисної зони, так і на ділянках із порушеним рослинним покривом. Оскільки, на території розташовані численні водойми, то в їхніх межах зустрічаються численні водні та прибережно-водні угруповання. Угруповань водних макрофітів дуже мало. Тут нами описано угруповання евтрофних макрофітів плаваючих на поверхні води

класу Lemnetaea. Їхнє фітоценотичне різноманіття низьке (1,8%). Разом із тим тут високе різноманіття прибережно-водної рослинності класу Phragmiti-Magnocaricetea (10,7%). Також, високі показники фітоценотичного різноманіття мають рудеральні угруповання класу Plantagenetea majoris (7,1), розташовані біля численних ґрунтових доріг та стежок. Помірні показники мають класи Robinietea (5,4%), Salicetea purpurea (5,4%), Epilobietea angustifolii (3,6%), Vaccinio-Piceetea (3,6%) та Polygono arenastri-Poëtea annuae (3,6%). Решта класів рослинних угруповань мають низькі показники фітоценотичного різноманіття – 1,8%.

Обговорення. Біотопи злакових угруповань класу Molinio-Arrhenatheretea в районі селітебних екосистем частіше за все представлені рослинністю порядку Galietalia veri, або штучно засіяні травостої з використанням медової трави (Holcus lanatus). У нашому випадку штучно створені сінокоси розташовані в південній частині СЗЗ, де утворилися рослинні угруповання асоціації Holcetum lanati. Проте, через їхнє антропогенне походження, флористичний склад цих угруповань є неповним, що проявляється в низькій кількості діагностичних видів союзу Deschampsion caespitosae та порядку Molinetalia [10]. Лише на ділянках, де Holcus lanatus поширився за межі початкового посіву, можна знайти фрагменти, які краще відповідають номенклатурному типу цієї асоціації. Угруповання злаковників порядку Arrhenatheretalia поширені нерівномірно, утворюючи невеликі мозаїчні плями. Їх можна знайти у пониженнях вздовж ґрунтових доріг

та вузькими смугами уздовж огорож. Переважно ці фітоценози представлені асоціацією Lolietum perennis та численними екотонними угрупованнями. Природні злакові угруповання, переважно належать до порядку Galietalia veri, характеризуються домінуванням таких асоціацій: Agrostietum vinealis-tenuis, Agrostio vinealis-Calamagrostietum epigeioris, Poo angustifoliae-Arrhenatheretum elatiori, Bromopsidetum inermis, Potentillo argenteae-Poetum angustifoliae та Achillea submiefolium-Dactyletum glomeratae. Подекуди також трапляються ділянки з рослинністю асоціацій Carici praecoci-Alopecuretum pratensis та Koelerio-Agrostietum vinealis.

На досліджуваній території синантропна рослинність представлена рудеральними та сеgetальними угрупованнями, які поширені спонтанно. Найбільше рудеральних фітоценозів з високим різноманіттям зосереджено безпосередньо на ділянці планованої діяльності. Ці угруповання охоплюють: 17 асоціацій класу Artemisietea vulgaris, 4 асоціації класу Plantaginetea majoris, 2 асоціації класу Polygono arenastri-Poëtea annuae. На ранніх стадіях сукцесії (заростання перелогів), а також у перший рік після повторного порушення ділянки, формується асоціація Agropyretum repentis (рис. 33). У її складі найчастіше домінують пирій повзучий (Elymus repens) та пирій середній (Elytrigia intermedia). Високе різноманіття сеgetальних угруповань обумовлене різноманітністю культивованих рослин на приватних ділянках, розташованих на периферії санітарно-захисної зони (СЗЗ). Серед них визначені такі асоціації: Centaureo-Aperetum spicae-

Таблиця 1

**Фітоценотичне різноманіття санітарно-захисної зони
полігону твердих побутових відходів м. Коростень**

Клас рослинних угруповань	Кількість асоціацій	Відсоток від загального числа асоціацій
Molinio-Arrhenatheretea	10	17,9
Artemisietea vulgaris	10	17,9
Stellarietea mediae	7	12,5
Phragmiti-Magnocaricetea	6	10,7
Plantagenetea majoris	4	7,1
Robinietea	3	5,4
Salicetea purpurea	3	5,4
Epilobietea angustifolii	2	3,6
Vaccinio-Piceetea	2	3,6
Polygono arenastri-Poëtea annuae	2	3,6
Lemnetaea	1	1,8
Trifolio-Geranietea	1	1,8
Sedo-Scleranthetetea	1	1,8
Nardetea strictae	1	1,8
Quercetea robori-petraeae	1	1,8
Alnetea glutinosae	1	1,8
Franguletea	1	1,8

venti, *Viola arvensis*-Centaureetum cyani, *Aphano-Matricarietum*, *Apero spicae*-venti-Papaveretum *rheoadis*, *Echinochloo-Setarietum*, *Brometum tectorum* та *Hordeetum murini*

Гідрофільно-прибережна рослинність вирізняється значним поширенням, високим флористичним різноманіттям та домінуванням у перезволожений порушених ландшафтах. Ці фітоценози належать до класу *Phragmiti-Magnocaricetea*. Найбільші площі в його складі займає монодомінантне угруповання асоціації *Phragmitetum australis*, яке сформоване очеретом південним (*Phragmites australis*) [11].

Висновки. Рослинність досліджуваної території включає в себе 17 класів, 25 порядків, 33 союзи та 57 асоціацій.

Найвище фітоценотичне різноманіття на досліджуваній території характерне для класів *Molinio-Arrhenatheretea* (17,9%), *Artemisietea vulgaris* (17,9%), *Stellarietea mediae* (12,5%) та *Phragmiti-Magnocaricetea* (10,7%).

Найнижчі показники фітоценотичного різноманіття (1,8) характерні для класів *Lemnetea*, *Trifolio-Geranietea*, *Sedo-Scleranthetetea*, *Nardetea strictae*, *Quercetea robori-petraeae*, *Alnetea glutinosae* та *Franguletea*.

Література

1. Боговін А. В. Антропогенна трансформація екологічних систем та її вплив на сучасний стан біорізноманіття. *Зрошуване землеробство*. 2011. № 55. С. 201–211.
2. Федорончук М.М., Зав'ялова Л.В., Кучер О.О., Коломійчук В.П., Конякін С.М., Лисогор Л.П., Прядко О.І. Синантропізація флори та рослинності – серйозна загроза біорізноманіттю. III Всеукраїнська наукова конференція «Синантропізація рослинного покриву України». *Вісник НАН України*. 2020, № 1. С. 62–67.
3. Закон України про оцінку впливу на довкілля. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (дата звернення: 20.07.2025)
4. Хом'як І. В. Антропогенна трансформація похідних лісів класу *Robinietea* на території Українського Полісся. *Український журнал природничих наук*. 2025. № 11. С. 314–324.
5. Дементєєва Я. Ю. Орнітофауна полігонів твердих побутових відходів міста Харкова. *Вісник Черкаського університету*. 2021. № 2(1). С. 26–36.
6. Якубенко Б. Є., Попович С. Ю., Устименко П. М., Дубина Д. В., Чурілов А. М. Геоботаніка: методичні аспекти досліджень. Київ: Ліра, 2020. 316 с.
7. Дубина Д. В. Продромус рослинності України. Київ: Наукова думка, 2019. 784 с.
8. Hennekens S. *Turboveg for Windows*. 1998–2007. Version 2. Wageningen: Institute voor Bos en Natuur, 2009. 84 p.
9. Хом'як І. В., Василенко О. М., Гарбар Д. А., Андрійчук Т. В., Костюк В. С., Власенко Р. П., Шпаковська Л. В., Демчук Н. С., Гарбар О. В., Онишук І. П., Коцюба І. Ю. Методологічні підходи до створення інтегрованого синфітоіндикаційного показника антропогенної трансформації. *Екологічні науки*. 2020. № 5(32), т. 1. С. 136–141.
10. Хом'як І. В., Хом'як О. І. Потенціал спонтанного тераформінгу ландшафтів суходолу з позицій сучасної теорії динаміки екосистем. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 8. С. 289–299.
11. Хом'як І. В., Коніщук В. В. Прибережно-водна та болотна рослинність гірничих об'єктів Центрального Полісся. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 10. С. 276–283.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РУЙНІВНОГО ВПЛИВУ БУДІВЕЛЬНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ҐРУНТИ УРБООКОСИСТЕМ

Яковишина Т.Ф., Москальов М.О.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро
t_yakovyshyna@ukr.net

EU Soil strategy до 2030 року передбачає досягнення стійкого розвитку ґрунтів, шляхом ефективного управління їх якістю, залучення інноваційних методів відновлення, запобігання деградації і забруднення на підставі системного підходу (EU Action Plan «Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil»). Розуміння руйнівного впливу будівельної діяльності та стан порушеного ґрунту надасть змогу вірно підібрати методи хімічної детоксикації та біоремедіації. Встановлено рівень порушення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро внаслідок провадження будівельної діяльності за показниками глибина гумусового горизонту та вміст гумусу, засміченість і каменястість, гранулометричний склад та щільність складення, як такий, що в сукупності діє екологічно небезпечним через втрату родючості та буферної властивості, спроможним підсилювати міграційну здатність металів-забруднювачів, спричиняти ризик вторинного забруднення ґрунтових вод, призводити до пилення та подальшої дефляційної втрати верхнього кореневмісного шару ґрунту. Виявлено, що втрати ґрунту пов'язані не тільки з безпосереднім впливом будівельної діяльності, а й зумовлюються подальшою його нераціональною експлуатацією при функціонуванні урбанізованих територій, котра за умов природних чинників, а саме, панівні ерозійнонебезпечні вітри, уклон поверхні, розріджений рослинний покрив, може призвести до майже повного його руйнування. Доведено необхідність врахування стану ґрунту при оцінюванні його забруднення, адже провадження будівельної діяльності негативно позначається на його екологічних функціях відносно родючості та буферності, отже впливає на вибір іммобілізаторів забруднювачів для хімічної детоксикації та рослин-оліготрофів при формуванні стійких фітоценозів в умовах техногенно навантажених урбоєкосистем. *Ключові слова:* порушення ґрунту, пилення, урбоєкосистема, екологічна небезпека, будівельна діяльність.

Ecological assessment of the destructive impact of the construction activities to the urban ecosystems soils. Yakovyshyna T., Moskalov M.

The EU Soil Strategy to 2030 envisages achieving sustainable soil development through effective management of their quality, using of the innovative restoration methods, and prevention of the degradation and pollution based on a systemic approach (EU Action Plan «Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil»). Understanding the destructive impact of the construction activities and the disturbed soil state will allow for the correct selection of the chemical detoxification and phytoremediation methods. The level of the soil disturbance in urban ecosystem of the Dnipro city has been established as a result of construction activities according to the indicators (depth of the humus horizon and humus content, garbage coverage and stoniness, granulometric content and density of the composition, as such that in the aggregate of the action is ecologically dangerous due to the loss of the fertility and buffer properties, capable of enhancing the migration ability of the polluting metals, causing the risk of the secondary contamination of the groundwater, leading to dusting and subsequent deflationary loss of the upper root-containing soil layer. The soil losses have been associated not only with the direct impact of the construction activities, but also with its further irrational exploitation during the functioning of urbanized areas, which under natural factors as prevailing erosion-hazardous winds, surface slope, sparse vegetation cover, can lead to its almost complete destruction. The need to take into account the soil state for pollution assessment has been proven, therefore implementation of the construction activities negatively affects to its ecological functions in terms of fertility and buffering, and affects to the choice of the pollutant immobilizers for chemical detoxification and oligotrophic plants when creating phytocenoses for the sustainable development of the urban ecosystems. *Key words:* soil disturbance, dusting, urban ecosystem, ecological hazard, construction activity.

Постановка проблеми. EU Soil strategy до 2030 року передбачає досягнення стійкого розвитку ґрунтів, шляхом ефективного управління їх якістю, залучення інноваційних методів відновлення, запобігання деградації і забруднення на підставі системного підходу (EU Action Plan «Towards Zero Pollution for Air, Water and Soil»). Увага фокусується не тільки на ґрунтах сільськогосподарського призначення, а й на урбаноземах, які виступають базисом природної складової міста, адже забезпечення екологічної безпеки населення техногенно навантажених урбоєкосистем неможливо без виконання ними певних екологічних функцій, як то буферна здатність відносно депонування металів-забруднювачів та родючість для формування зеленого каркасу міста. Розуміння руйнівного впливу будівельної діяльності та стан порушеного ґрунту надасть змогу вірно підібрати іммобілізатори металів-забруднювачів для хімічної детоксикації та рослин-оліготрофів при створенні фітоценозів для стійкого розвитку урбоєкосистем.

Актуальність дослідження. Інтенсивний антропогенний вплив на ґрунти розпочинається безпосередньо з провадження будівельної діяльності в результаті чого руйнується його структура, погіршуються показники повітряного і водного режимів, частково втрачається родючість, знижується буферна властивість до забруднення небезпечними речовинами. В сукупності зі зміною рельєфу через зрізанням позитивних і засипанням негативних його форм,

намавом порід, підрізкою схилів це призводить до пилення, підсилює ерозійні процеси іноді до майже повної втрати ґрунтового покриву. Слід зважати на те, що в урбоєкосистемі, втім, як і в будь-якій іншій екосистемі, ґрунт виступає базисом, порушення якого призведе до неспроможності виконувати свої екологічні функції, приміром, в межах міста може виникнути ціла низка проблем відносно, по-перше, родючості, пов'язана із відтворенням рослинного покриву, отже, негативно відбиватися на створенні сприятливого мікроклімату, надходженні кисню, поглинанні шкідливих газуватих сполук листовою поверхнею рослин; а, по-друге, буферної властивості щодо закріплення токсикантів та зменшення їх міграційної здатності, підвищуючи екологічну небезпеку для міського населення (рис. 1). Тому досить важливо розуміти ступінь порушення міських ґрунтів, що опосередковано відбивається на його родючості та буферній здатності, при розробці заходів з детоксикації забруднення та створенні фітоценозів для забезпечення екологічної безпеки населення та сталого розвитку урбоєкосистеми.

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

Дослідження проведено у рамках реалізації Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.02.2019 р.); Указу Президента України № 722 від 30.09.2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» (ціль 11 – забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст, інших населених пунктів); під час виконання у Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» НДР «Інноваційні технології захисту довкілля для забезпечення екологічної безпеки техногенно-навантажених регіонів» (державний реєстраційний номер 0124U002506, 2024-2027 рр.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В межах урбоєкосистеми особливостям формування специфічних ґрунтових тіл – урбаноземів з описом їх профілів приділяли увагу в роботах [3, 5, 6], класифікації – [7], хімічному складу і фізико-хімічним властивостям – [1, 8]. Проблема деградації ґрунтів, втрати гумусу та поживних елементів опрацьована відносно земель сільськогосподарського призначення, методи відновлення розроблені для поруше-

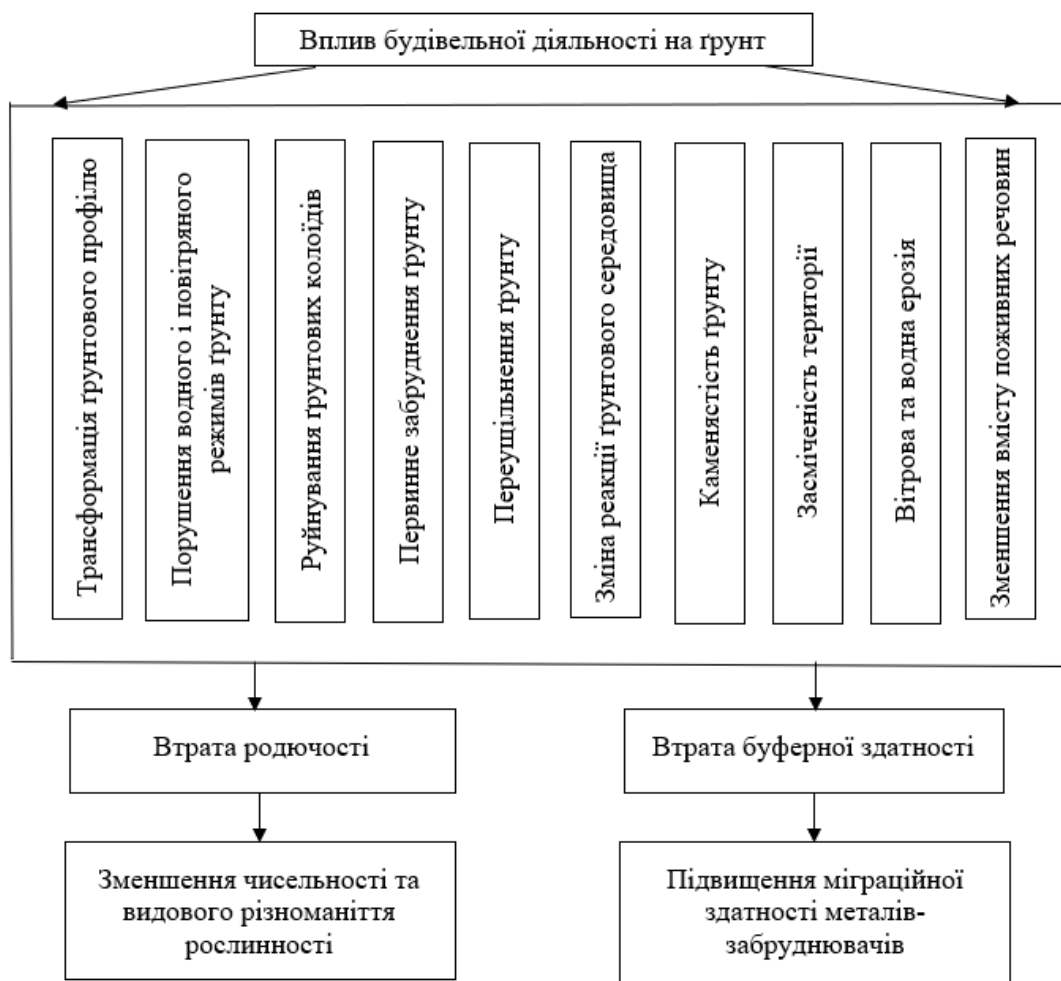


Рис. 1. Негативні наслідки впливу будівельної діяльності на ґрунт урбоєкосистеми

них гірничо-добувною діяльністю ґрунтів, які потребують рекультивациі [4]. Проте системи оцінювання забруднення металами ґрунтів [9, 11] та технології їх детоксикації й біоремедіації [1, 8] зумовлюють необхідність врахування стану порушеного внаслідок будівельної діяльності ґрунту, його родючості та буферної здатності, розуміння можливості їх відновлення чи навпаки втрати з урахуванням фактору часу та за умов різного функціонального використання території.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблема дослідження полягає в обґрунтуванні залучення показників для характеристики втрат та стану порушення внаслідок будівельної діяльності міських ґрунтів і їх здатності виконувати свої екологічні функції в урбоєкосистемі відносно забезпечення поживними елементами рослинності та як іммобілізатора забруднюючих речовин.

Новизна. Встановлено втрати та рівень порушення ґрунтів м. Дніпро при провадженні будівельної діяльності та подальшого функціонування урбоєкосистеми для висотної житлової забудови та штучно створеної рекреаційної зони відносно зонального ґрунту – чорнозему звичайного малогумусного важкосуглинкового. Науково обґрунтовано при розробці і впровадженні методів детоксикації хімічного забруднення та формуванні стійких фітоценозів зважати на стан порушеного ґрунту та додатково залучати заходи спрямовані на підтримку його родючості та буферної здатності.

Методологічне або загальнонаукове значення. Оцінку впливу будівельної діяльності на ґрунти проводили в межах ґрунтово-кліматичних умов урбоєкосистеми м. Дніпро на різних стадіях: безпосередньо перед початком при плануванні поверхні на території будівельного майданчику (кільцева розв'язка пр. Героїв і вул. Космічна) та через 38 років після будівництва з природним заростанням території (вул. Запорізьке шосе на виїзді з міста) відносно зеленої зони – ділянка Набережної Перемоги, що не зазнала екореконструкції, та зонального ґрунту – чорнозему звичайного малогумусного важкосуглинкового. Всі ділянки знаходилися на правобережній частині міста, як такий що має складний рельєф, який підсилює процеси втрати ґрунту. Досліджувані ґрунти були представлені урбаноземами – в перших двох випадках з перемішаним, а в останньому з насипним типом ґрунтового профілю.

Для встановлення ступеня порушення ґрунтів визначали наступні показники: глибину гумусового горизонту та вміст гумусу за методом І.В. Тюріна (ДСТУ 7855:2015); засміченість поверхні; кам'яність в шарі 0,5 м; щільність складення (ДСТУ ISO 11272:2001); гранулометричний склад шляхом сухого просіювання (ДСТУ ISO 11277:2005).

Дефляційні втрати ґрунту розраховували за математико-статистичною моделлю, розробленою

Українським науково-дослідним інститутом захисту ґрунтів від ерозії (УкрНДІЗГЕ), використовуючи формулу (1):

$$A_w = \frac{(0,45L - 4,1HK_i)btK_vV_mK_{of}}{6331aS} \quad (1)$$

де A_w – втрати ґрунту, т/га; l – довжина ділянки в напрямку ерозійнонебезпечного потоку вітрів, м; b – ширина ділянки в напрямку перпендикулярному до пануючих вітрів, м; H – висота бар'єру, м; K_n – коефіцієнт «ефективної висоти» бар'єрів; t – число годин з пиловою бурею, год.; V_m – швидкість вітру під час пилової бурі, м/с; K_v – коефіцієнт зміни швидкості вітру в умовах рельєфу та інших рубежів; a – відстань, на якій перенос ґрунтового матеріалу досягає максимального значення при стандартній швидкості, м; S – площа досліджуваної ділянки, га; K_{of} – коефіцієнт відкритості ділянки [2].

Викладення основного матеріалу. Одним із головних показників, що визначають обидві екологічні функції ґрунту, а саме підтримують родючість і забезпечують іммобілізацію забруднювачів, виступає вміст гумусу, який слід оцінювати у сукупності з глибиною гумусованого профілю, що, по-перше, надасть розуміння стосовно забезпеченості рослин достатнім рівнем живлення, а, по-друге, визначить реальний рівень екологічної небезпеки за рухомими формами металів-забруднювачів та глибиною їх проникнення і створення вторинного забруднення при потрапленні в ґрунтові води.

Вміст гумусу в кореневмістому шарі (0-30 см) чорнозему звичайного становив 4,03 %, в той час як в урбаноземах насипного типу в зеленій зоні – 2,57 %, перемішаного типу – 2,14 % для висотної забудови, що зазнала одноразового втручання будівельної діяльності 38 років назад, та 1,68 % на ділянці колишнього приватного сектору підготовленої під будівництво. Низький вміст гумусу в зеленій зоні зумовлювався особливостями її формування при вирівнюванні берегової лінії та наміванні території, на якій більш ніж пів століття тому відбудовувався житловий масив «Перемога» за експериментальним проєктом Дніпроцивільпроєкту.

Глибина гумусованого профілю зонального ґрунту досить потужна з чітким переходом і становить 62,1-65,8 см, на відміну від досліджуваних урбаноземів, а саме, перемішаний тип – подовжений (84,7-91,3 см) і нечітко виражений за рахунок перемішування генетичних горизонтів при проведенні земляних робіт та насипний тип – спрощений (43,2-44,8 см), що негативно відбивалося через розрідженість рослинного покриву.

Поверхня ґрунтів урбанізованих територій перекривалась включеннями антропогенного походження, серед яких значну частину являло будівельне сміття, найбільше на ділянці колишнього приватного сектору підготовленої під будівництво – 24,7 %, вплив кліматичних факторів та механічне

руйнування протягом тривалого часу призвело до зменшення як розмірів включень, так і площі перекриття – 11,4 % на ділянці висотної забудови та 5,6 % – штучно створена зелена зона.

Найбільша каменястість була притаманна території підготовленій під будівництво – 12,2 %, в шарі 0-50 см урбаноземах перемішаного типу висотної забудови та насипного типу зеленої зони вміст каміння був значно меншим 8,3 % і 4,6 % відповідно, що вище за зональний ґрунт, якому каменястість взагалі не характерна.

Засміченість та каменястість сприяють збільшенню енергетичних витрат ґрунтової біоти на їх огинання при рості чи русі, а також до ускладненню посадки рослин, отже створенню стійких фітоценозів на території міста, здатних підтримувати екологічний каркас. Їх сукупна негативна дія відбивалася на екологічних функціях ґрунту через вплив на повітряний і водний режими, а саме швидке висушування кореневмісного шару та нестачу води для нормального росту і розвитку рослин, що є лімітуючим фактором в умовах Північного Степу України, куди територіально відноситься і м. Дніпро та зниження сорбційних захисних буферних властивостей щодо іммобілізації забруднювачів.

Вплив антропогенної діяльності позначався на гранулометричному складі ґрунту через збільшення каменястої фракції внаслідок будівництва та підвищення кількості пиловатих часток розміром менш за 0,01 мм при функціонуванні урбоєкосистеми за рахунок механічного впливу на його поверхню. Збільшення мілкодисперсних часток сприяє закріпленню катіонів металів на їх поверхні, що не дає змоги їх поглинання кореневою системою рослин, але призводить до утворення токсичного пилу та підвищує екологічну небезпеку розповсюдження в атмосферному повітрі. Вміст фракції 0,01-0,001 мм у чорноземі звичайного становив 49,7 %, яка збільшувалась при провадженні будівельної діяльності до 56,0-59,1 % та становила 40,2 % у штучно створеній зеленій зоні.

Гранулометричний склад, каменястість та наявність мілкодисперсної фракції позначалися на щільності ґрунту – головному агрофізичному критерію його якості стосовно накопичення максимальних запасів доступної вологи для рослин при достатній кількості повітря. Щільність складення чорнозему звичайного малогумусного важкосуглинкового становила 1,21 г/см³, в той час, як урбанозем висотної забудови був переущільнений – 1,38 г/см³, а значення даного показника на ділянці, підготовленій під будівництво майже відповідало зональному ґрунту – 1,26 г/см³. Екологічна небезпека переущільненого ґрунту пов'язана з пригніченням і в деяких випадках загибеллю рослин навіть за умов достатнього зволоження та вмісту поживних речовин [10], збільшенням поверхневого стоку, пиленням при механічному впливі, розвитком ерозійних процесів з подальшою

втратою ґрунту. В зеленій зоні домінувала піщана фракція, щільність складення становила 1,14 г/см³, що при дуже розрідженому рослинному покриву обґрунтовувало необхідність розрахунку дефляційних втрат ґрунту.

Величина втрати ґрунту була зумовлена розташуванням досліджуваних ділянок відносно панівних ерозійнонебезпечних вітрів, уклоном та відкритістю поверхні внаслідок розрідженого рослинного покриву, відсутністю перешкод на шляху потоку вітра. Як показали результати розрахунків найбільші втрати зазнають території висотної забудови та майбутнього будівельного майданчику – 0,054 та 0,053 в перерахунку на т/га, в той час як зелена зона майже вдвічі менше – 0,028 т/га, що зумовлюється зміною гранулометричного складу і зменшенням фракції пиловатих часток ґрунту через тривалий вплив ерозійних процесів. При підготовці ділянки під будівництво фактор часу та відсутність рослинного покриву підвищують екологічну небезпеку порушення та пилення ґрунту.

Головні висновки. Встановлено рівень порушення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро внаслідок провадження будівельної діяльності за показниками глибина гумусового горизонту та вміст гумусу, засміченість і каменястість, гранулометричний склад та щільність складення, як такий, що в сукупності діє екологічно небезпечним через втрату родючості та буферної властивості, спроможним підсилювати міграційну здатність металів-забруднювачів, спричиняти ризик вторинного забруднення ґрунтових вод, призводити до пилення та подальшої дефляційної втрати верхнього кореневмісного шару ґрунту. Виявлено, що втрати ґрунту пов'язані не тільки з безпосереднім впливом будівельної діяльності, а й зумовлюються подальшою його нераціональною експлуатацією при функціонуванні урбанізованих територій, котра за умов природних чинників, а саме, панівні ерозійнонебезпечні вітри, уклон поверхні, розріджений рослинний покрив, може призвести до майже повного його руйнування. Доведено необхідність врахування стану ґрунту при оцінюванні його забруднення, адже провадження будівельної діяльності негативно позначається на його екологічних функціях відносно родючості та буферності, отже впливає на вибір іммобілізаторів забруднювачів для хімічної детоксикації та рослин-оліготрофів при формуванні стійких фітоценозів в умовах техногенно навантажених урбоєкосистем.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані при розробці заходів з пилопригнічення та оструктурювання міських ґрунтів, що зазнали руйнівного впливу будівельної діяльності, для відтворення рослинного покриву та підвищення буферної здатності з подальшим забезпеченням екологічної безпеки населення урбоєкосистем.

Література

1. Луцишин О.Г., Радченко В.Г., Палапа Н.В., Яворовський

- П.П., Весна В.Я., Скрипник Г.Л., Ковальова О.М. Фізико-хімічні властивості ґрунтів в умовах Київського мегаполісу. Доповіді Національної академії наук України. 2011. № 3. С. 197-204.
2. Світличний О.О., П'яtkова А.В. Прикладне ерозієзнавство: навч. посіб. – Одеса : Одес. нац. ун-т ім. І. І. Мечникова, 2020. – 136 с.
 3. Яковичина Т.Ф. Екологічна оцінка порушення ґрунту внаслідок будівельної діяльності. Будівництво. Матеріалознавство. Машинобудування. 2015. Вип. 81. С. 268-272.
 4. Padhye L.P., Srivastava P., Jasemizad T., Bolan S., Hou D., Shaheen S.M., Rinklebe J., O'Connor D., Lamb D., Wang H., Siddique K.H.M., Bolan N. Contaminant containment for sustainable remediation of persistent contaminants in soil and groundwater. *Journal of Hazardous Materials*. 2023. 455. 131575. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131575>
 5. Pavao-Zuckerman M. The nature of urban soils and their role in ecological restoration in cities. *Restoration Ecology*. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2008.00486.x>
 6. Pouyat R.V., Day S.D., Brown S., Schwarz K., Shaw R.E., Szlavecz K., Trammell T.L.E., Yesilonis I.D. Forest and rangeland soils of the united states under changing conditions, 2020. P. 127-144. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45216-2_7
 7. Subhadip P., Amitava R. Classification and functional characteristics of urban soil. *Soils in Urban Ecosystem*. 2022. P.11-23. DOI:10.1007/978-981-16-8914-7_2
 8. Xie T., Hou Y., Weiping C., Wang M., Sidan L., Li X. Impact of urbanization on the soil ecological environment: a review. *Acta Ecologica Sinica*. 2019. 39(4). DOI:10.5846/stxb201809131973
 9. Yakovyshyna, T., Nester, A., Pashechko, M., Kalda G., Sokolan, J., Piegdon, I. Specificities of considering migration capability of heavy metals in assessing ecological hazard of polluting soils of urban ecosystems. *Journal of Ecological Engineering*. 2025. 26(4), P. 37-44.
 10. Zandybay A., Saspugayeva G., Khussainov M., Karelkhan N., Kydyrova A., Adylbek Zh. Assessing the impact of urban development on soil health and nutrient cycling across urban areas. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. 25(12). P. 106-123. <https://doi.org/10.12911/22998993/193832>
 11. Zhang J., Peng W., Lin M., Liu C., Chen S., Wang X., Gui H. Environmental geochemical baseline determination and pollution assessment of heavy metals in farmland soil of typical coalbased cities: A case study of Suzhou City in Anhui Province, China. *Heliyon*. 2023. 9(1):e14841. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14841>

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

МОНІТОРИНГ БІОРІЗНОМАНІТТЯ ТА ШУМОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ В МЕЖАХ ОВІДІОПОЛЬСЬКОЇ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Яненко В.С., Клепко А.В.

Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, 03041, м. Київ
yanenko2028@gmail.com

Представлено результати комплексного дослідження орнітофауни, хіроптерофауни (рукокрилих) та шумового навантаження в зоні впливу Овідіопольської вітроелектростанції (ВЕС), розташованої в Одеській області. Метою дослідження була оцінка екологічного стану природних компонентів у контексті функціонування ВЕС з урахуванням біологічного моніторингу та інструментальних вимірювань.

Польові дослідження орнітофауни проводилися у квітні 2021 року методом маршрутних обліків і спостережень на пунктах моніторингу. Усього виявлено щонайменше 27 видів птахів загальною чисельністю 1001 особина. Основну частку становили синантропні та польові види, що свідчить про адаптацію орнітокомплексу до антропогенного впливу. Значна частина птахів пролітала на висотах нижче рівня обертання лопатей турбін, що знижує ризик зіткнень.

Моніторинг хіроптерофауни здійснювався за допомогою ультразвукових детекторів, встановлених поблизу турбін. Виявлено 448 звукових сигналів, які належать шести видам рукокрилих. Найвищу активність виявлено у нетопира білосмугового (*Pipistrellus kuhlii*), що характерно для відкритих і напіввідкритих ландшафтів. Акустична активність тривала понад 8 годин, що свідчить про стабільне функціонування популяцій.

Аналіз рівнів шуму показав, що на відстані понад 350 м від турбін шумове навантаження не перевищує допустимі нормативи. У межах житлової забудови селища Овідіополь і села Дальник рівні звукового тиску знаходяться в межах санітарних норм.

Результати дослідження підтверджують можливість гармонійного поєднання розвитку вітроенергетики з принципами збереження біорізноманіття за умови дотримання екологічних вимог на етапі планування, будівництва та експлуатації ВЕС. Отримані дані можуть бути використані для вдосконалення процедур оцінки впливу на довкілля, а також у науково-освітній та природоохоронній діяльності. *Ключові слова:* орнітофауна, хіроптерофауна, шум, вітроелектростанція, екологічний моніторинг, акустичне навантаження, біорізноманіття, альтернативна енергетика.

Monitoring of biodiversity and noise pollution within the Ovidiopol wind power plant. Yanenko V., Klepko A.

This article presents the results of a comprehensive study of the avifauna, chiropteroфауна (bats), and acoustic impact within the influence zone of the Ovidiopol Wind Power Plant (WPP), located in the Odesa region, Ukraine. The aim of the study was to assess the environmental condition of natural components in the context of WPP operation through biological monitoring and instrumental measurements. Field observations of birds were conducted in April 2021 using transect counts and fixed observation points. A total of 27 bird species and 1001 individuals were recorded. The dominant species were synanthropic and field-dwelling birds, indicating the adaptation of the local bird community to anthropogenic pressure. Most individuals flew below the blade rotation height, reducing collision risk. Bat monitoring was carried out using an ultrasonic detector placed near the turbine. In total, 448 acoustic signals were recorded, most of which were attributed to six bat species, while three signals remained unidentified. The highest activity was observed in the Kuhl's pipistrelle (*Pipistrellus kuhlii*), which is typical for open and semi-open landscapes. The activity lasted over 8 hours, suggesting stable population functioning.

Noise level measurements showed that beyond 350 meters from the turbines, acoustic impact did not exceed regulatory limits. In residential areas of Ovidiopol and Dalnyk, sound pressure levels remained within sanitary norms. The results confirm the potential for sustainable integration of wind power development with biodiversity conservation, provided that ecological regulations are followed during WPP planning, construction, and operation. These findings may support environmental impact assessments and serve scientific, educational, and conservation purposes.

The research highlights the importance of integrated, site-specific environmental assessments that combine instrumental noise monitoring and biological observations. These approaches are essential for identifying local ecological risks and informing mitigation strategies in wind energy development projects. *Key words:* avifauna, bats, chiropteroфауна, noise, wind power plant, environmental monitoring, acoustic load, biodiversity, renewable energy.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток вітроенергетики як складової відновлюваної енергетики є стратегічним напрямом для України в контексті європейської інтеграції, декарбонізації економіки та зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Однак впровадження об'єктів вітроенергетики пов'язане з низкою екологічних викликів,

зокрема впливом на біоту, зміну середовища існування та трансформацію природних ландшафтів [1].

Проблема взаємодії між інфраструктурними об'єктами, такими як вітроелектростанції (ВЕС), і компонентами екосистем, особливо чутливими до просторових та акустичних змін, є надзвичайно важливою для екології. Особливу увагу в цьому контек-

сті привертають птахи та рукокрилі (хіроптерофауна) – групи, які найбільш гостро реагують на зміну акустичного середовища, появу бар'єрів та зміну шляхів міграції [2; 3].

Крім безпосередніх загроз, як-от зіткнення з лопатями турбін, ВЕС створюють низку непрямих ефектів, пов'язаних із шумовим навантаженням, світловим впливом, деградацією середовищ існування. За даними європейських досліджень, такі впливи здатні призводити до скорочення локальних популяцій, зміни поведінки тварин, фрагментації ареалів [4; 5].

В Україні питання впливу ВЕС на навколишнє природне середовище на сьогодні вивчене фрагментарно. Дослідження часто мають оцінковий характер, базуються на обмежених спостереженнях та не враховують сезонну й просторову динаміку. Водночас поширення ВЕС триває, і без належної науково-методичної бази неможливо забезпечити сталий розвиток цієї галузі без загроз для біорізноманіття.

Актуальність дослідження. У природоохоронному аспекті актуальність проблеми «ВЕС – природні комплекси – довкілля» визначається національним законодавством, зокрема Законами України «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про тваринний світ», «Про Червону книгу України», а також Постановами Кабінету Міністрів України щодо збереження біорізноманіття та охорони водно-болотних угідь міжнародного значення [5; 6; 10; 11].

Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» (№ 2059-VIII від 23.05.2017) зобов'язує суб'єктів господарювання проходити відповідну процедуру у випадках, коли встановлюються дві і більше турбіни або висота кожної перевищує 50 метрів. В рамках цієї процедури екологічна оцінка має включати обов'язкове вивчення стану фауни, зокрема птахів і рукокрилих, а також шумового впливу [10].

Вітроенергетика є динамічною галуззю: потужності турбін зростають, ареал їх розміщення розширюється, а впливи на довкілля вимагають все більш глибокої екологічної оцінки. Водночас вітрові електростанції часто розташовуються у відкритих ландшафтах, які є місцем міграцій та проживання багатьох видів птахів та рукокрилих.

Особливої уваги заслуговує досвід функціонування Овідіопольської ВЕС – першого масштабного проєкту вітроенергетики на території Одеської області, реалізованого за участі іноземного інвестора. Саме такі приклади дають змогу оцінити реальні екологічні наслідки роботи ВЕС на локальному рівні, і водночас напрацювати універсальні підходи до екологічного моніторингу.

Таким чином, дослідження впливу ВЕС на птахів, рукокрилих та шумове середовище є надзвичайно актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору. Вони сприяють удосконаленню природоохоронної політики в умовах енергетичного переходу України.

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

Дослідження узгоджується з завданнями державної екологічної політики України та процедурою оцінки впливу на довкілля (ОВД) щодо об'єктів відновлюваної енергетики. Зокрема, це передбачено статтями 3 та 6 Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» [10]. Автори спрямували зусилля на удосконалення підходів до моніторингу орніто- та хіроптерофауни, інтегруючи біоіндикаційні та шумові дані в структуру екологічної оцінки. Результати мають міждисциплінарне значення і можуть бути використані для звітної документації ОВД та природоохоронного планування в регіоні Причорномор'я, а також відповідають настановам Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України щодо розвитку ВДЕ [11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Світова наукова спільнота протягом останніх двох десятиліть активно досліджує екологічні наслідки впровадження об'єктів вітроенергетики. Особливу увагу приділено впливу ВЕС на біоту, зокрема на орнітофауну та рукокрилих, які найбільш чутливі до просторових змін середовища, акустичних коливань і механічних бар'єрів у вигляді вітротурбін [1–3].

У роботах Limpens та співавт. [4], а також Voigt і Lehnert [3], зазначено, що рукокрилі можуть бути дезорієнтовані шумовим і візуальним фоном, створеним вітротурбінами, що призводить до зіткнень, зниження чисельності та зміни активності. Подібна ситуація спостерігається і серед птахів, особливо під час весняної та осінньої міграції, коли вітропарки створюють бар'єрний ефект або приваблюють види, чутливі до змін у середовищі [6].

Національні дослідження у цій сфері лише починають систематизуватися. Як показано в роботах Яненка, Скрипника, Максина та ін. [7], вітроенергетика в Україні стрімко зростає, проте супровід її розвитку екологічним моніторингом залишається нерівномірним. Законодавчо, вітропарки підлягають процедурі оцінки впливу на довкілля (ОВД), що передбачає обов'язкові дослідження біотичних і абіотичних факторів у зоні впливу об'єкта.

У межах цього підходу важливо враховувати досвід реалізації проєктів, таких як Овідіопольська ВЕС – перша повномасштабна вітроелектростанція на території Одеської області, збудована іноземним інвестором, де встановлено 9 турбін типу GE 3.6-131 з одиничною потужністю 3,6 МВт [8]. Просторова структура станції, розташованої між селом Дальник і селищем Овідіополь, створює потенційний вплив на локальні орнітокомплекси й колонії рукокрилих, а також змінює акустичний режим території.

На момент написання статті в Україні відсутня єдина база даних щодо довгострокових спостережень за впливом ВЕС на орніто- і хіроптерофауну, що суттєво ускладнює оцінку наслідків для біорізноманіття. Це зумовлює необхідність поглибле-

них інструментальних досліджень з урахуванням сезонних, просторових і техногенних факторів, що й покладено в основу цієї роботи.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність окремих досліджень, в Україні досі бракує комплексної оцінки впливу ВЕС, яка б поєднувала біомоніторинг, ультразвукову детекцію рукокрилих та інструментальні вимірювання шуму. Залишається недостатньо вивченим вплив таких об'єктів у регіонах активної міграції птахів, зокрема в Північно-Західному Причорномор'ї.

Ця стаття зосереджується на аналізі взаємозв'язку між просторовим розміщенням ВЕС, шумовим навантаженням і фауною, що є актуальним напрямом екологічної оцінки, зокрема й у європейській практиці, де просторово-функціональний аналіз застосовується для планування вітрових електростанцій [12].

Наукова новизна дослідження. Уперше в Україні проведено комплексне дослідження впливу діючої вітроелектростанції на орніто- та хіроптерофауну із залученням інструментального шумового аналізу. Запропоновано інтегративний підхід до оцінки еко-

логічного стану території, що поєднує біоіндикаційні та акустичні методи. Визначено видовий склад фауни та охарактеризовано просторові особливості її розподілу в зоні впливу ВЕС.

Методологічне або загальнонаукове значення. Отримані результати можуть бути використані для формування стандартів біоекологічного моніторингу ВЕС в Україні. Методика поєднання польових спостережень, ультразвукової реєстрації та вимірювань шуму має потенціал для інтеграції в процедури оцінки впливу на довкілля. Дослідження сприяє розвитку міждисциплінарного підходу в екологічній експертизі об'єктів відновлюваної енергетики.

Викладення основного матеріалу. У межах комплексного біологічного моніторингу території Овідіопольської ВЕС оцінювались три основні компоненти: орнітофауна, хіроптерофауна (рукокрилі) та акустичні параметри середовища.

З метою просторової візуалізації ходу дослідження на рисунку 1 подано схему розташування турбін, маршрутів обліку орнітофауни (МО) та стаціонарних точок акустичних вимірювань (ПС-1 –



Рис. 1. Просторове розміщення вітроелектростанцій, маршрутів орнітологічного обліку (МО) та точок стаціонарного спостереження (ПС-1 – ПС-3) у межах Овідіопольської ВЕС

ПС-3), які обирали таким чином, щоб максимально охопити оглядовість на ВЕУ. Це дозволяє краще зрозуміти специфіку польових робіт у межах ділянки впливу діючої Овідіопольської ВЕС.

Як видно на мапі (рис. 1), стаціонарні точки ПС-1 – ПС-3 та маршрут МО охоплюють ключові ділянки території в межах прогнозованого впливу турбін. Такий підхід дозволив забезпечити репрезентативність результатів і врахувати просторову змінність у поведінці різних груп тварин. Нижче подано результати спостережень за орнітофауною в зоні функціонування Овідіопольської ВЕС.

Польові дослідження орнітофауни проводились у квітні 2021 року в межах Овідіопольської вітроелектростанції. Для фіксації птахів застосовувались маршрутні обліки (МО) та спостереження на трьох стаціонарних пунктах (ПС-1, ПС-2, ПС-3). Загалом було зареєстровано 1001 особину, що належала до 27 видів [1]. Видове різноманіття у стаціонарних точ-

ках виявилось вищим (25 видів), ніж на маршруті МО (17 видів) (табл. 1).

За характером перебування у зоні впливу ВЕС птахи були розподілені на три категорії: транзитні мігранти – 527 особин (52,7 %), кормові мігранти – 435 особин (43,5 %), демонстраційні особини – 1 птах (0,1 %). Найбільшу активність зафіксовано в напрямках північному (325 птахів), південному (177) та південно-західному (149), що свідчить про наявність транзитної міграції через територію розміщення ВЕС.

Результати візуального спостереження за висотами польотів показали, що переважна більшість птахів (684 особини, або 71 %) пересувалася на висоті до 10 метрів. Ще 176 особин (18,3 %) пролітали на висоті 11-25 м, а 96 птахів (10 %) – на висотах понад 26 м. Це дозволяє зробити висновок, що більшість птахів уникала зони обертання лопатей турбін, що знижує ризики зіткнень.

Таблиця 1

Видовий склад орнітофауни в зоні ВЕС у квітні 2021 року

№	Українська назва	Наукова назва	ПС1	ПС2	ПС3	МО	Квітень
1	Боривітер звичайний	<i>Falco tinnunculus</i>	1	-	-	1	2
2	Ворона сіра	<i>Corvus cornix</i>	4	11	10	2	27
3	Горобець польовий	<i>Passer montanus</i>	26	20	41	21	108
4	Грак	<i>Corvus frugilegus</i>	28	10	9	18	65
5	Дрізд чорний	<i>Turdus merula</i>	4	2	4	-	10
6	Жайворонок польовий	<i>Alauda arvensis</i>	8	-	-	-	8
7	Зяблик	<i>Fringilla coelebs</i>	30	8	15	8	61
8	Канюк звичайний	<i>Buteo buteo</i>	-	2	1	2	5
9	Кібчик	<i>Falco vespertinus</i>	-	1	-	-	1
10	Крижень	<i>Anas platyrhynchos</i>	-	-	-	35	35
11	Крук	<i>Corvus corax</i>	-	-	-	1	1
12	Куріпка сіра	<i>Perdix perdix</i>	4	-	-	3	7
13	Ластівка сільська	<i>Hirundo rustica</i>	25	-	102	70	197
14	Лунь очеретяний	<i>Circus aeruginosus</i>	1	1	-	-	2
15	Мартин жовтоногий	<i>Larus cachinnans</i>	6	7	9	6	28
16	Мартин звичайний	<i>Larus ridibundus</i>	7	12	12	18	49
17	Мухоловка строката	<i>Ficedula hypoleuca</i>	6	10	5	-	21
18	Одуд	<i>Upupa epops</i>	11	-	5	-	16
19	Плиска біла	<i>Motacilla alba</i>	13	-	-	15	28
20	Плиска жовта	<i>Motacilla flava</i>	1	-	-	9	10
21	Плиска чорноголова	<i>Motacilla feldegg</i>	1	-	-	-	1
22	Припутень	<i>Columba palumbus</i>	8	6	8	2	24
23	Просянка	<i>Emberiza calandra</i>	1	1	1	-	3
24	Сорока звичайна	<i>Pica pica</i>	8	5	1	7	21
25	Шпак звичайний	<i>Sturnus vulgaris</i>	133	40	42	48	263
26	Щиглик звичайний	<i>Carduelis carduelis</i>	-	-	7	-	7
27	Яструб малий	<i>Accipiter nisus</i>	-	-	1	-	1
Всього			326	136	273	266	1001

Примітки: ПС – пункт спостережень; МО – маршрутні обліки.

Серед наймасовіших видів були зафіксовані: шпак звичайний (*Sturnus vulgaris*) – 263 особини, ластівка сільська (*Hirundo rustica*) – 197 та горобець польовий (*Passer montanus*) – 108 особин. Сумарна чисельність цих трьох видів становила 568 особин, або 56,7 % загальної кількості. Ще 13 видів були представлені чисельністю в межах 10-99 особин, а 11 видів – поодинокими реєстраціями.

Результати дослідження свідчать, що орніто-комплекс території представлений переважно адаптованими синантропними та польовими видами, що є типовим для агроландшафтів з помірним техногенним навантаженням. Масових скупчень або проходу мігруючих видів, занесених до Червоної книги України, на дослідженій ділянці не зафіксовано. Загалом, вплив Овідіопольської ВЕС на орнітофауну можна оцінити як помірний і локалізований, а стабільна структура пташиних угруповань свідчить про адаптацію фауни до умов функціонування об'єкта.

Окрім денних видів фауни, важливим елементом екосистемного моніторингу є нічна біота, зокрема рукокрилі, які є чутливими до змін середовища, шумового фону та освітлення. Саме тому оцінка стану хіроптерофауни є ключовим індикатором екологічного впливу ВЕС.

Моніторинг акустичної активності рукокрилих проводився в ніч з 20 на 21 квітня 2021 року за допомогою ультразвукових детекторів *Echo Meter Touch 2 Pro*, встановленого поблизу турбіни № 1 на висоті 2,5 м. Координати місця встановлення: 46°12.872'N, 30°29.252'E. Прослуховування тривало з 18:00 до 06:00, у режимі *Live mode* з подальшою комп'ютерною обробкою сигналів у програмному середовищі *Echo Meter* (рис. 2).

Протягом дослідження було зареєстровано 448 звукових сигналів, що належали до 6 видів рукокрилих, ще 3 сигнали залишились неідентифікованими. Перший сигнал зафіксовано о 20:19, останній – о 04:26, що свідчить про тривалу нічну активність тривалістю 8 годин 7 хвилин.

Найвищу акустичну активність серед зафіксованих рукокрилих демонстрував нетопир білосмутий (*Pipistrellus kuhlii*), на частку якого припадає 322 сигнали, що становить 71,88 % від загальної кількості.

Значно меншу активність показали інші види: лилик двоколірний (*Vespertilio murinus*) – 87 сигналів (19,42 %), вечірниця дозріла (*Nyctalus noctula*) – 17 (3,79 %), пергач пізній (*Eptesicus serotinus*) – також 17 (3,79 %), та нетопир карлик (*Pipistrellus pipistrellus*), активність якого була зафіксована лише у двох випадках (0,45 %).

Загальна видова структура представлена в таблиці 2:

Найвища активність рукокрилих спостерігалась у перші 2 години після заходу сонця, що відповідає типовому добовому ритму хіроптерофауни.

Хоча реєстрація відбувалась лише протягом однієї весняної ночі, наявність 6 підтверджених видів свідчить про високу видову різноманітність у прибережній зоні ВЕС. Подальше дослідження в різні сезони дозволило б точніше оцінити динаміку та чутливість популяцій.

Загалом, хіроптерофауна в зоні впливу ВЕС демонструє стабільну активність без значних знижень частоти сигналів, що свідчить про відсутність стресових факторів. Переважання Нетопира білосмутого *Pipistrellus kuhlii* є типовим для таких умов і відповідає результатам досліджень аналогічних територій в Європі [3; 4].

Важливим доповненням до біологічного моніторингу є аналіз шумового навантаження як одного з ключових антропогенних факторів, що може впливати як на фауну, так і на життєдіяльність людини. Акустична оцінка була проведена для чотирьох контрольних точок у межах зони впливу ВЕС.

Ділянка, де розміщується ВЕС знаходиться у південній частині Овідіопольського району (нині – південно-західна частина Одеського району), та прилягає до дороги, яка одночасно є в'їздом до вітроелектростанції та з'єднує два населених пункти – селище Овідіополь та село Дальник. Територія досліджень представлена сільськогосподарськими угіддями, на яких зростають зернові, олійні та технічні культури, і незначні площі представлені землями запасу (пасовища і сіножатні) та штучними лісовими насадженнями (лісосмугами). Вимірювання фонових рівнів шуму включали в себе проведення досліджень рівнів звукового тиску в октавних полосах частот і рівень звуку по частотній корекції (A) в кожній точці.

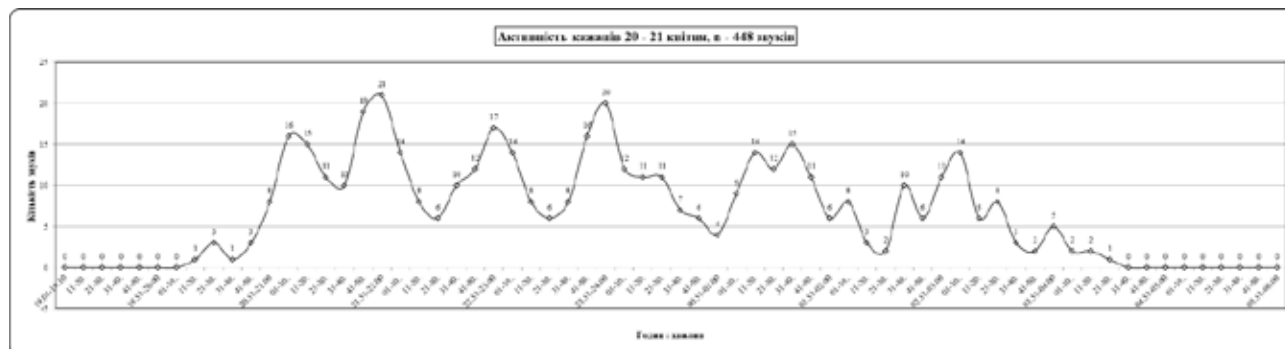


Рис. 2 Динаміка добової весінньої активності хіроптерофауни 20-21 квітня 2021 року

Таблиця 2

Звукова активність рукокрилих у ніч з 20 на 21 квітня 2021 року

№	Українська та латинська назва	Звуків	
		абс.	%
1.	Вечірниця дозірна <i>Nyctalus noctula</i> (Schreber, 1774)	17	3,79
2.	Нетопир білосмугий <i>Pipistrellus kuhlii</i> (Kühl, 1817)	322	71,88
3.	Нетопир лісовий <i>Pipistrellus nathusii</i> (Keyserling et Blasius, 1839)		
4.	Нетопир карлик <i>Pipistrellus pipistrellus</i> (Schreber, 1774)	2	0,45
5.	Лилик двоколірний <i>Vespertilio murinus</i> (Linnaeus, 1758)	87	19,42
6.	Пергач пізній <i>Eptesicus serotinus</i> (Schreber, 1774)	17	3,79
7.	Не визначено	3	0,67
Всього		448	100

Таблиця 3

Характеристика точок вимірювання шуму в зоні впливу ВЕС

№ ВТ	Місце розміщення ВТ
ВТ № 1	На відстані 7 м від ВЕУ № 1 ТОВ «ОВІД ВІНД»
ВТ № 2	В межах СЗЗ ВЕС (700 м), відстань 350 м від ВЕУ № 1
ВТ № 3	Територія, яка безпосередньо прилягає до житлових будинків селища Овідіополь. 830 м від ВЕУ № 1
ВТ № 4	Територія, яка безпосередньо прилягає до житлових будинків с. Дальник. На відстані 980 м від ВЕУ № 4

Таблиця 4

Результати вимірювань фонових рівнів звуку та рівнів звукового тиску

№ ВТ	Рівні звукового тиску, дБ, в октавних смугах з середньо-геометричними частотами, Гц									Рівень звуку, (екв. рівень звуку), дБА	Макс. рівень звуку, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	102,9	94,7	90,3	77,2	69,3	58,3	55,6	52,9	46,1	69,5	88,4
2	82,7	73,1	65,4	52,4	45,2	41,9	36,9	27,4	19,7	54,9	69,3
3	63,7	58,4	54,3	48,6	43,6	47,9	46,9	34,2	24	46,2	55,6
4	65,8	54,9	43,5	36,2	30,6	30,6	29,1	24,4	24,4	42,9	59,6
Допустимі рівні шуму (в денний період доби)	89	75	66	59	54	50	47	45	43	55	70

Примітка: допустимі рівні шуму (в денний період доби) прийнято згідно до ДБН В.1.1-31:2013 «Захист територій, будинків і споруд від шуму», Таблиця 1, пункт 25.

Особливу увагу було приділено розташуванню ВЕС відносно житлової забудови. Всього було виділено 4 вимірювальні точки (ВТ), їх характеристику наведено в таблиці 3.

У ВТ № 1 акустична обстановка визначається на період проведення вимірювань, шумом від роботи ВЕУ, а у точках досліджень 2, 3 та 4 формувалась за рахунок звуків антропогенного походження та шумом від руху транспортних засобів, оскільки поруч проходять автошляхи.

Результати вимірювань фонових рівнів звуку та рівнів звукового тиску наведені в таблиці 4.

За результатами вимірювань рівнів звуку в октавних смугах частот, а також еквівалентних і макси-

мальних рівнів шуму, проведених у буферній зоні ВЕС (на відстані 350 м від найближчої вітроустановки), а також у межах житлової забудови селища Овідіополь та села Дальник, можна констатувати наступне:

– для територій, а саме місць розташування вимірювальних точок № 1 та № 2 де проводились вимірювання нормативні рівні шуму та рівні звукового тиску законодавством не встановлені;

– на момент проведення вимірювань рівні звуку в октавних смугах частот та еквівалентні і максимальні рівні шуму, зменшуються при віддаленні від ВЕУ та вже на відстані 350 м від ВЕУ знаходяться в межах нормативних значень;

– виміряні рівні звуку та рівні звукового тиску у точках проведення вимірювань № 3 (селище Овідіополь) та № 4 (село Дальник) не перевищують нормативних значень, що приведені у п.42 додатку 1 Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови [6].

Результати демонструють, що Овідіопольська ВЕС відповідає вимогам до шумового навантаження, визначеним нормативно-правовими актами України.

Головні висновки. Результати дослідження вказують на помірний екологічний вплив функціонуючої Овідіопольської ВЕС на біоту та акустичне середовище. Орнітологічне різноманіття території представлено щонайменше 27 видами у квітні, переважно синантропними та польовими, з домінуванням польотів на висотах, нижчих за рівень обертання турбін, що знижує ризики зіткнень. Подібні закономірності підтверджені в європейських дослідженнях, де доведено залежність безпеки птахів від розташування ВЕС поза міграційними коридорами [1, 2].

У межах одного нічного спостереження (подано як приклад, оскільки дослідження проводили комплексно та прослуховування робили по декілька ночей поспіль, щомісяця) виявлено акустичну активність шести видів рукокрилих, серед яких домінував Нетопир білосмугий *Pipistrellus kuhlii* – вид, адаптований до відкритих ландшафтів. Акустична стабільність та тривалість активності свідчать про задовільний стан рукокрилих популяцій у зоні впливу. Факторів ризику, як-от яскраве освітлення чи лісосмуги, у межах ВЕС не виявлено, що знижує ймовірність дезорієнтації тварин [3].

Рівні шуму, зафіксовані в буферній зоні та житлових кварталах, не перевищували нормативні показники згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [6], що вказує на відсутність негативного акустичного впливу за межами виробничої ділянки.

Узагальнюючи, дослідження підтверджує можливість гармонійного поєднання функціонування ВЕС із принципами охорони біорізноманіття, за умови дотримання екологічних вимог на всіх етапах реалізації таких проєктів. Отримані результати можуть бути використані в процедурах оцінки впливу на довкілля та для планування екологічно безпечної експлуатації аналогічних об'єктів на території України.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення підходів до екологічного супроводу вітроенергетичних об'єктів, зокрема в межах процедур оцінки впливу на довкілля. Це відповідає загальносвітовим тенденціям трансформації енергетики та переходу до сталої генерації [9]. Вони є практичною основою для розробки рекомендацій щодо мінімізації впливів на птахів і рукокрилих, а також для адаптації проєктних рішень із урахуванням специфіки біорізноманіття. Крім того, отримані дані можуть бути включені до локальних екологічних баз спостережень, використовуватись у науково-освітній діяльності, а також у роботі природоохоронних установ для прийняття рішень на рівні регіонального екологічного планування. Такий підхід узгоджується з прогнозами Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики щодо трансформації глобального енергетичного балансу до 2050 року [9].

Література

1. Ballejo F., Plaza P. I., Lambertucci S. A. Humans have time to discuss conceptual frameworks, some threatened species have not. *Biological Conservation*. 2020. Vol. 250. P. 108748. URL: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108748> (дата звернення: 20.06.2025).
2. Ahlén, I., Baagøe, H. J., Bach, L. Bats and offshore wind turbines studied in southern Scandinavia / I. Ahlén et al. Bromma : Naturvårdsverket, 2007. 35 p.
3. Дика природа та відновлювана енергія: німецька політика щодо мігруючих кажанів / К. К. Фойгт та ін. *Європейський журнал досліджень дикої природи*. 2015. Том 61, № 2. С. 213–219. URL: <https://doi.org/10.1007/s10344-015-0903-y> (дата доступу: 29.06.2025).
4. Limpens H. J. G. A., Roschen A. Ідентифікація видів кажанів Центральної Європи на основі їхніх криків. Бремервворде. 1995. Екологічна піраміда NABU.
5. ДСТУ 8339:2015. Вітроенергетика. Вітроелектростанції. Оцінення впливу вітроелектростанцій на навколишнє середовище. [Чинний від 2015-06-22].
6. ДСН 3.3.6.037-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. [Чинний від 1999-01-12].
7. Яненко В. С., Максін В. І., Скрипник А. П., Трачук М. А. Перспективи розвитку вітроенергетики в Україні. *Використання альтернативних джерел енергії в умовах розвитку сільських територій*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Полтава, 22 листопада 2019 р. / Полтава : РВВ ПДАА, 2019 р. С. 29-32. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/materialy-2-mnpk-vykorystannja-alternatyvnyh-dzherel-enerhiyi.-poltava-22.11.19.pdf>
8. Стратегія розвитку Одеської області на 2021–2027 роки. URL: <https://oda.od.gov.ua/ua/strategiya-rozvytku-odeskoyi-oblasti-na-2021-2027-roku> (дата звернення: 27.06.2025).
9. Глобальна енергетична трансформація: Дорожня карта до 2050 року (видання 2019 року). *IRENA – Міжнародне агентство з відновлюваної енергії*. URL: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-A-roadmap-to-2050-2019Edition> (дата доступу: 27.06.2025).
10. Про оцінку впливу на довкілля : Закон України від 23.05.2017 № 2059-VIII : станом на 15.11.2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text> (дата звернення: 30.07.2025).

11. Офіційний сайт Держенергоефективності – головного енергоменеджера країни. URL: <https://saee.gov.ua/> (дата звернення: 28.06.2025).
12. Josimović B. Просторові аспекти впливу вітрових електростанцій на навколишнє середовище: монографія. Белград : Інститут архітектури та міського та просторового планування Сербії (IAUS), 2020. 182 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 14.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ СКЛАДУ КАР'ЄРНИХ ВОД У КОНТЕКСТІ ОЦІНКИ АНТРОПОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА РІЧКОВІ ЕКОСИСТЕМИ

Валерко Р.А., Бондарчук В.М., Герасимчук Л.О.

Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир

valerko_ruslana@ukr.net, kvm_bvm@ztu.edu.ua, gerasim4uk@ukr.net

У статті досліджено гідрохімічний склад кар'єрних вод ПрАТ «Транснаціональна корпорація «Граніт», яка функціонує у межах Коростенського району Житомирської області, що скидаються у річку Уж, з метою оцінки їхнього впливу на річкову екосистему. Моніторинг, проведений у 2021–2023 роках, охоплював 13 показників, серед яких: рН, амонійний азот, нітрити, нітрати, залізо загальне, фосфати, ХСК, БСК₅, хлориди, сульфати, сухий залишок, завислі речовини. Проаналізовано взаємозв'язки між показниками рН, азоту амонійного, нітритів, нітратів, заліза загального, фосфатів, ХСК, БСК₅, хлоридів, сульфатів, сухого залишку та завислих речовин.

Кореляційний аналіз показав сильні позитивні зв'язки між ХСК і сульфатами ($r = 0,94$), амонійним азотом і ХСК ($r = 0,85$), а також між хлоридами і сухим залишком ($r = 0,86$), що вказує на наявність органічного та мінерального навантаження. Висока кореляція між БСК₅ і фосфатами ($r = 0,72$) свідчить про біогенне забруднення, ймовірно, побутового походження. Помірні зв'язки між БСК₅, сульфатами, сухим залишком і залізом загальним свідчать про участь колоїдних та органічних форм у процесах мінералізації. Водночас, встановлено сильні негативні кореляції: між рН і хлоридами ($r = -0,89$), рН і сухим залишком ($r = -0,86$), що вказує на зниження лужності з ростом мінералізації. Практично нульовий зв'язок між залізом і ХСК ($r = -0,047$), а також між залізом і нітратами ($r = 0,011$) свідчить про незалежні джерела формування цих компонентів.

Отримані результати дозволяють ідентифікувати основні джерела забруднення та запропонувати кореляційний підхід як інструмент оцінки антропогенного впливу на водні екосистеми. Методологія може бути використана в системі моніторингу, оцінки ризиків і планування природоохоронних заходів. *Ключові слова:* кар'єрні води, кореляційний аналіз, гідрохімія, техногенне навантаження, річкові екосистеми.

Correlation Analysis of Quarry Water Composition Indicators in the Context of Assessing Anthropogenic Pressure on River Ecosystems. Valerko R., Bondarchuk V., Herasymchuk L.

The article examines the hydrochemical composition of quarry waters discharged by PJSC “Transnational Corporation Granit,” operating within the Korosten district of Zhytomyr region, into the Uzh River, aiming to assess their impact on the river ecosystem. Monitoring conducted during 2021–2023 covered 13 indicators, including: pH, ammonium nitrogen, nitrites, nitrates, total iron, phosphates, COD, BODs, chlorides, sulfates, total dissolved solids (TDS), and suspended solids. Correlations between the parameters were analyzed: pH, ammonium nitrogen, nitrites, nitrates, total iron, phosphates, COD, BODs, chlorides, sulfates, TDS, and suspended solids.

Correlation analysis revealed strong positive relationships between COD and sulfates ($r = 0.94$), ammonium nitrogen and COD ($r = 0.85$), as well as between chlorides and TDS ($r = 0.86$), indicating the presence of both organic and mineral pollution. A strong correlation between BODs and phosphates ($r = 0.72$) points to biogenic contamination, likely of domestic origin. Moderate correlations between BODs, sulfates, TDS, and total iron suggest the involvement of colloidal and organic forms in mineralization processes. Meanwhile, strong negative correlations were found between pH and chlorides ($r = -0.89$), pH and TDS ($r = -0.86$), indicating a decrease in alkalinity with increasing mineralization. Virtually no correlation was observed between iron and COD ($r = -0.047$), as well as between iron and nitrates ($r = 0.011$), suggesting different sources and behavior of these components.

The obtained results make it possible to identify the main sources of pollution and propose a correlation-based approach as a tool for assessing anthropogenic pressure on river ecosystems. The methodology can be applied in monitoring systems, risk assessment, and planning of environmental protection measures. *Key words:* quarry water, correlation analysis, hydrochemistry, anthropogenic pressure, river ecosystems.

Постановка проблеми. Гірничодобувна діяльність, зокрема видобуток і переробка гранітних порід, супроводжується утворенням значного обсягу шахтно-кар'єрних вод, які скидаються у прилеглі водні об'єкти. Такі води часто мають специфічний хімічний склад, обумовлений як природними геохімічними особливостями, так і техногенним впливом. Річкові екосистеми є вразливими до змін гідрохіміч-

ного режиму, що може призводити до деградації біоти, погіршення якості води та втрати екосистемних послуг.

Актуальність дослідження. Зростання інтенсивності гірничодобувної діяльності в Україні та світі зумовлює посилення антропогенного навантаження на водні екосистеми, що створює серйозні екологічні загрози. Особливу стурбованість викликає вплив

шахтно-кар'єрних вод, які у процесі експлуатації родовищ потрапляють до поверхневих водних об'єктів і змінюють їх гідрохімічний режим. Це, у свою чергу, може призводити до накопичення токсичних речовин, евтрофікації, зниження біорізноманіття та деградації водних ресурсів [1, 2]. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із необхідністю забезпечення сталого водокористування та охорони водного середовища, надзвичайно актуальним є дослідження просторових і хімічних закономірностей поширення забруднення в районах функціонування гірничодобувних підприємств [3, 4].

На сьогоднішній день існує потреба в розробці науково обґрунтованих підходів до ідентифікації джерел забруднення і кластеризації гідрохімічних параметрів як інструменту для екологічного моніторингу та оцінки ризиків [5, 6]. Проведення кореляційного та кластерного аналізу показників складу кар'єрних вод дозволяє не лише виявити критичні фактори впливу, але й оптимізувати природоохоронні заходи з урахуванням регіональних особливостей [7].

Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями. Запропоновані у статті підходи до аналізу гідрохімічного складу кар'єрних вод із використанням кореляційно-кластерного моделювання спрямовані на виявлення основних чинників забруднення та диференціацію джерел надходження шкідливих речовин у поверхневі води. Що дозволить покращити систему екологічного моніторингу, забезпечити ефективний контроль за дотриманням екологічного законодавства та обґрунтувати управлінські рішення щодо оптимізації режиму скидів.

Дослідження має прикладне значення для екологічної оцінки впливу підприємств добувної галузі на водні об'єкти, а також може використовуватись органами місцевого самоврядування, екологічними службами та водогосподарськими організаціями під час планування заходів з очищення вод, адаптації інженерних споруд, запровадження превентивного моніторингу та екологічної експертизи проектів. Крім того, дані та методи можуть бути інтегровані в систему екологічного управління промисловими об'єктами, що відповідає вимогам сталого розвитку та європейської інтеграції екологічної політики України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема впливу гірничодобувної діяльності на водне середовище активно висвітлюється у сучасній науковій літературі. Ряд досліджень підтверджує, що скидання кар'єрних вод до поверхневих водних об'єктів є одним із ключових факторів деградації водних екосистем, зокрема через підвищення концентрацій заліза, марганцю, сульфатів, азотовмісних сполук і зниження рН [8, 9, 10].

Виділяються дослідження, присвячені використанню статистичних методів для аналізу якості води.

Наприклад, Khorashadi Zadeh та ін. успішно застосували кластерний та компонентний аналіз для ідентифікації зон забруднення у річкових системах, що зазнають впливу антропогенного навантаження [5]. Подібний підхід був використаний також у дослідженнях Tutu та ін. для класифікації гідрохімічних процесів у регіонах, уражених кислотним дренажем шахт [4]. Значна увага в сучасних публікаціях приділяється необхідності адаптації концепції «водного сліду» (water footprint) для гірничодобувної галузі з метою врахування не лише кількісного, а й якісного впливу на ресурси [11]. Це особливо актуально для регіонів із дефіцитом води або з інтенсивною експлуатацією підземних вод.

Окремі українські дослідження, зокрема роботи Гаврилук та ін., вказують на істотний вплив гранітних кар'єрів на підземні та поверхневі води у межах Українського щита [12]. У дослідженні [13] відзначають зміну гідрохімічного фону у річці Тетерів у результаті господарської діяльності у прилеглих до водозбору районах.

Таким чином, наукова спільнота визнає важливість комплексного підходу до вивчення як кількісних, так і якісних змін у водному середовищі, зумовлених впливом гірничодобувної промисловості, а також потребу в інструментах ранньої ідентифікації потенційних джерел забруднення.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна. Встановлення причинно-наслідкових зв'язків між скидами шахтно-кар'єрних вод та змінами у якості річкових вод є складним завданням, оскільки ці процеси залежать від численних взаємопов'язаних факторів. У цьому контексті особливого значення набуває застосування кореляційного аналізу для виявлення залежностей між окремими гідрохімічними показниками води, що дозволяє краще зрозуміти характер антропогенного впливу та обґрунтувати природоохоронні заходи. Проблема полягає у відсутності достатньої кількості комплексних досліджень, які б базувалися на кількісній оцінці взаємозв'язків між показниками складу кар'єрних вод і якістю води річок у зоні діяльності гірничодобувних підприємств.

Методологічне або загальнонаукове значення. У межах дослідження було здійснено аналіз гідрохімічного складу кар'єрних вод, що формуються в результаті виробничої діяльності ПрАТ «Транснаціональної корпорації «Граніт» та скидаються у річку Уж. Моніторинг охоплював період 2021–2023 років, протягом якого систематично відбиралися проби кар'єрних вод у двох точках: за 500 м вище та нижче умовної точки скиду. Визначалися такі показники: рН, амонійний азот, нітрити, нітрати, загальне залізо, фосфати, хімічне споживання кисню (ХСК), хлориди, сульфати, завислі речовини, нафтопродукти, сухий залишок і біохімічне споживання кисню за 5 діб (БСК₅).

Виклад основного матеріалу. У результаті досліджень було встановлено, що найбільші коливання спостерігалися за вмістом азоту амонійного, нітритів, заліза загального, фосфатів і БСК₅. У декількох випадках концентрації нітритів, амонійного азоту та заліза перевищували гранично допустимі значення, встановлені для водойм господарсько-побутового призначення.

Зокрема, вміст загального заліза протягом всього періоду дослідження перевищував гранично допустимий скид (0,1 мг/дм³) у 3–4 рази як у точці вище, так і нижче скиду. Вміст амонійного азоту перевищував норматив у окремі періоди майже вдвічі. Концентрації фосфатів залишалися в межах допустимих значень (ГДС = 0,7 мг/дм³), проте їх динаміка вказує на нестабільність навантаження з боку виробництва.

Для поглибленої інтерпретації результатів було побудовано кореляційну матрицю, на основі якої можна проаналізувати взаємозв'язки між гідрохімічними показниками (рис. 1).

На основі наданої кореляційної матриці можна проаналізувати взаємозв'язки між гідрохімічними показниками. Оцінювання коефіцієнтів Пірсона (від -1 до +1) дозволяє визначити ступінь і напрямок кореляції. Кореляційний аналіз дозволив виділити сильні позитивні кореляції (рис. 2), сильні нега-

тивні кореляції (рис. 3), помірні кореляції (табл. 1) та слабкі або відсутні кореляції (табл. 1).

Аналіз кореляційних зв'язків між основними гідрохімічними показниками кар'єрних вод свідчить про наявність статистично значущих взаємозалежностей, які дозволяють зробити висновки щодо джерел та типів забруднення.

Найвищу кореляцію виявлено між хімічним споживанням кисню (ХСК) та сульфатами ($r = 0,94$), що вказує на ймовірну спільність джерел органічного та сірчаного забруднення, зокрема на побутові чи технологічні стоки. Сильний позитивний зв'язок між азотом амонійним і ХСК ($r = 0,85$) свідчить про домінування органічного забруднення антропогенного походження, зокрема продуктів азотовмісного розкладу. Кореляція між азотом амонійним та сульфатами ($r = 0,82$) також підтримує припущення щодо участі побутових стоків або інфільтрату з розроблених територій як основного джерела навантаження. Хлориди та сухий залишок мають тісний зв'язок ($r = 0,86$), що є характерною ознакою мінералізації водного середовища, яка, ймовірно, обумовлена фоновим геохімічним складом порід та можливим додатковим внеском з техногенних джерел. Висока кореляція між фосфатами та ХСК ($r = 0,76$) свідчить про супровід органічного забруднення сполуками фосфору, які часто надходять у воду з мийними засо-

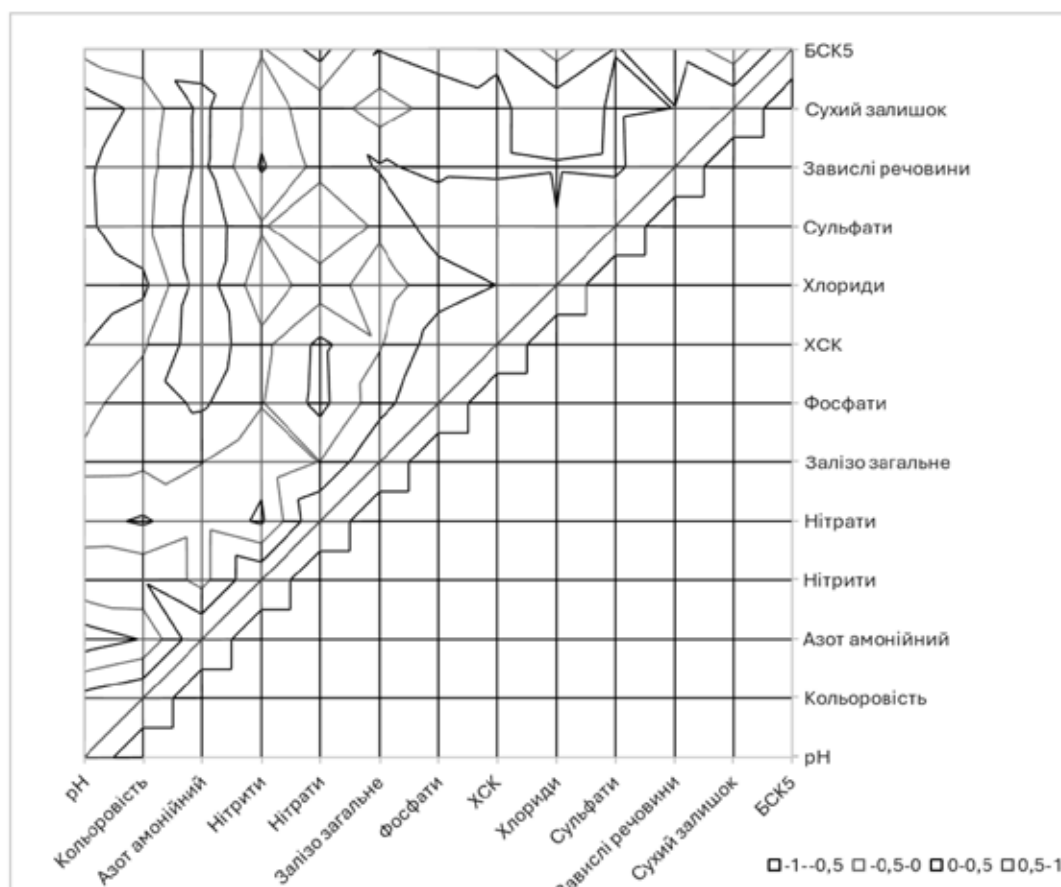
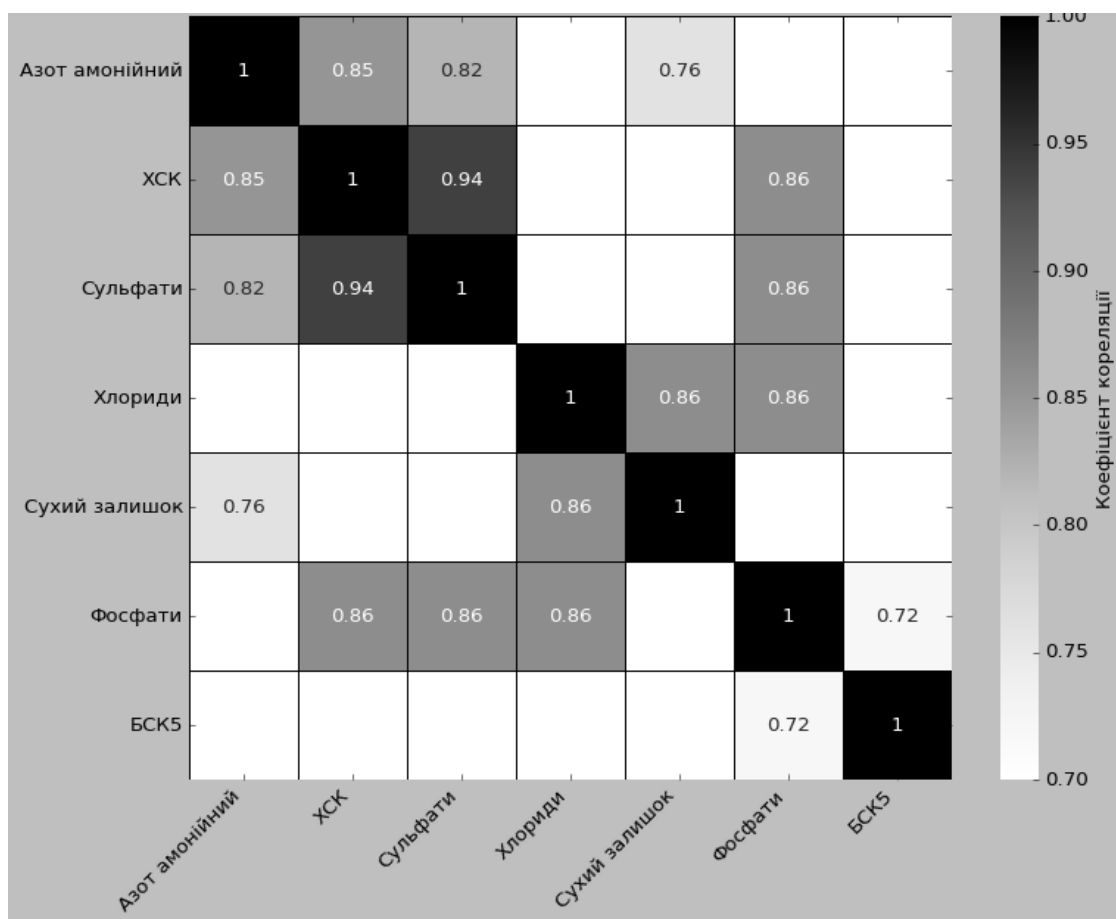
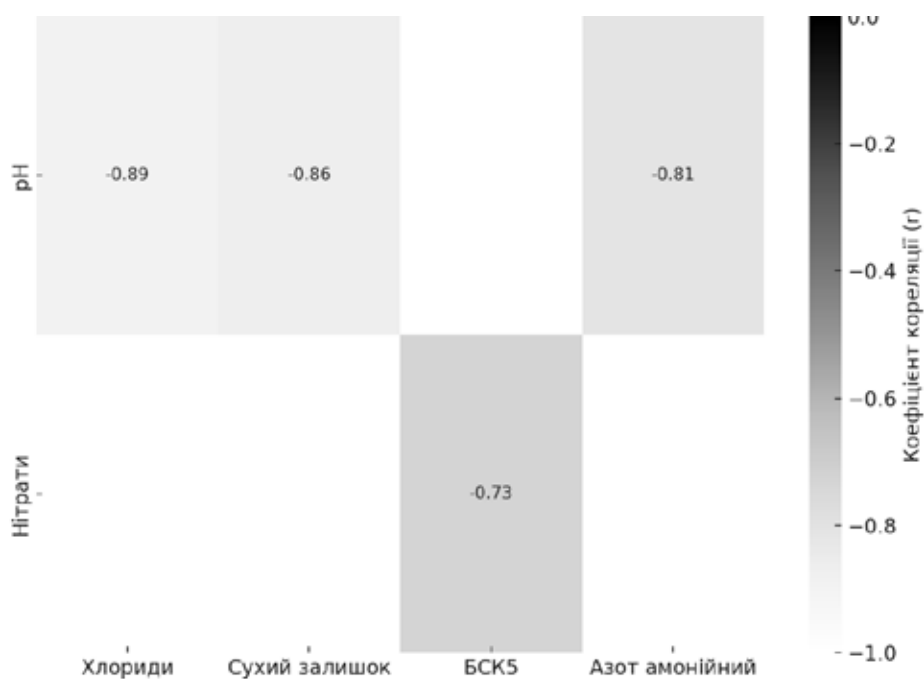


Рис. 1. Кореляційна матриця показників складу кар'єрних вод

Рис. 2. Сильні позитивні кореляції ($r > 0,7$)Рис. 3. Сильні негативні кореляції ($r < -0,7$)

бами або агрохімікатами. Зв'язок між БСК₅ і фосфатами ($r = 0,72$) підтверджує наявність біогенного навантаження, що активує біохімічне споживання кисню в процесі мінералізації речовин (рис. 2).

Негативна кореляція між рН і хлоридами ($r = -0,89$) вказує на підвищення кислотності води за умов зростання солевого навантаження, зокрема надходження хлоридів. Така залежність може бути пов'язана зі скидами високомінералізованих вод або інфільтрацією з ділянок накопичення техногенних відходів. Тісний зворотний зв'язок між рН і сухим залишком ($r = -0,86$) підтверджує, що зростання мінералізації супроводжується зниженням лужності середовища, що може вказувати на накопичення мінеральних компонентів, які спричиняють кислотну реакцію. Кореляція між нітратами та БСК₅ ($r = -0,73$) вказує на зворотну залежність між кінцевими продуктами окиснення азотовмісних сполук і активністю біохімічних процесів, зокрема споживанням кисню. Це може свідчити про те, що при значному вмісті нітратів органічна речовина вже трансформована до стабільних неорганічних форм. Нарешті, сильний негативний зв'язок між рН та азотом амонійним ($r = -0,81$) свідчить про підкислення середовища внаслідок надходження амонійних форм азоту, які можуть походити з господарсько-побутових або фільтраційних стоків (рис. 3).

Виявлено декілька пар показників, що демонструють середню силу позитивної кореляції ($r = 0,51-0,64$), що свідчить про потенційну спільність джерел забруднення або узгодженість фізико-хімічних процесів у водному середовищі. Зокрема, помірну позитивну кореляцію виявлено між азотом амонійним і сухим залишком ($r = 0,64$), що вказує на внесок азотовмісних сполук у загальну мінералізацію води. Така залежність є типовою для вод, які зазнають впливу господарсько-побутових стоків, а також фільтратів із зон техногенного впливу. Інша важлива пара – БСК₅ і ХСК ($r = 0,59$) – демонструє узгоджене органічне забруднення, що підтвер-

джує активну участь органічних речовин у процесах хімічного та біохімічного окиснення у воді. Така комбінація часто є індикатором забруднення органікою біогенного походження (побутові або аграрні стоки). Зв'язок БСК₅ і сульфатів ($r = 0,51$) свідчить про можливу присутність забруднень побутового або тваринницького походження, де сульфати можуть утворюватися внаслідок розкладання органіки або використання миючих засобів і дезінфектантів. Також встановлено помірний зв'язок між загальним залізом і БСК₅ ($r = 0,52$), що дозволяє припустити можливу участь колоїдного або органічно зв'язаного заліза у складі води. Такий тип зв'язку характерний для вод, забруднених розчинними формами металів, які взаємодіють з органікою (табл. 1).

У межах дослідження також проаналізовано пари показників, які не продемонстрували суттєвого кореляційного зв'язку ($r \approx 0$). Такі результати свідчать про незалежність змін у концентраціях відповідних компонентів або про відмінну природу їх походження та міграційної поведінки у водному середовищі. Зокрема, між загальним залізом і ХСК коефіцієнт кореляції становить $r = -0,047$, що фактично свідчить про відсутність взаємозв'язку між вмістом заліза та рівнем хімічного споживання кисню. Такий результат може вказувати на незалежну поведінку заліза, яке, ймовірно, присутнє у воді в неорганічній або колоїдній формі, не пов'язаній із органічними домішками. Аналогічно, між загальним залізом і нітратами спостерігається практично нульова кореляція ($r = 0,011$), що свідчить про відсутність окислативної взаємодії між цими компонентами у досліджених умовах. Це може бути результатом різних механізмів надходження: нітратами формуються внаслідок нітрифікації, тоді як залізо може надходити з ґрунтових порід у формі нерозчинних оксидів або гідроксидів (табл. 2).

Такі результати свідчать про складну і неоднорідну структуру джерел забруднення, яка може включати як органічні, так і мінеральні компоненти,

Таблиця 1

Помірні кореляції ($r = 0,5-0,7$)

Параметри	Коефіцієнт, r	Інтерпретація
Азот амонійний – Сухий залишок	0,64	Внесок у загальну мінералізацію
БСК ₅ – ХСК	0,59	Узгоджене органічне забруднення
БСК ₅ – Сульфати	0,51	Ймовірно побутове або тваринницьке походження
Залізо – БСК ₅	0,52	Можлива участь колоїдного заліза в органічному комплексі

Таблиця 2

Слабкі або відсутні кореляції (r близько 0)

Параметри	Коефіцієнт, r	Інтерпретація
Залізо – ХСК	-0,047	Показує незалежність загального заліза від органічного навантаження
Залізо – Нітратами	0,011	Окислативна форма заліза не пов'язана із нітратами

що діють незалежно один від одного у гідросистемі. Залізо, зокрема, може надходити з мінеральної основи кар'єру, а не з органічного навантаження, притаманного господарським або аграрним стокам.

Висновки. Отримані результати засвідчують складну структуру забруднення та неоднорідність джерел впливу, що поєднує як побутові, аграрні, так і геохімічно обумовлені чинники. Проведений аналіз демонструє ефективність використання кореляцій-

но-статистичних методів як інструменту екологічного моніторингу та оцінки впливу гірничодобувної діяльності на водні екосистеми.

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований підхід може бути використаний для оптимізації управлінських рішень, розробки природоохоронних заходів та підтримки сталого водокористування в регіонах із підвищеним техногенним навантаженням.

Література

1. Ali H., Khan E., Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2022. Article ID 4296872. <https://doi.org/10.1155/2022/4296872>.
2. Vavrková M. D., Winkler J., Adamcová D., Kotovicová, J. Environmental assessment of heavy metal pollution in industrial and mining areas: A case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, No. 2. P. 1566–1576. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11079-1>.
3. Younger P. L. Mine water pollution: The remarkable recovery of the River Tyne. *Science of the Total Environment*. 2002. Vol. 265, No. 1–3. P. 185–208. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00675-4](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00675-4).
4. Tutu H., McCarthy T. S., Cukrowska E. The chemical characteristics of acid mine drainage with particular reference to sources, distribution and remediation: The Witwatersrand Basin, South Africa as a case study. *Applied Geochemistry*. 2011. Vol. 26, No. 12. P. 2364–2374. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.09.002>.
5. Khorashadi Zadeh Z., Soleimani M., Rezaei H., Ghomi M. Application of cluster and principal component analyses in the evaluation of water quality of rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193, No. 2. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08859-6>.
6. Fashola M. O., Ngole-Jeme V. M., Babalola O. O. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016. Vol. 13, No. 11. Article 1047. <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>.
7. Bondarchuk V. M., Valerko R. A. Identification of pollution sources and clustering of hydrochemical parameters of quarry water in the area of mining enterprise operations. *Science and education under the influence of global challenges : proceedings of the II International scientific and practical conference / International Humanitarian Research Center (Chernihiv, 2025, July 15)*. Research Europe, 2025. P. 60 – 63. DOI: <https://doi.org/10.64076/ihrc250715.09>.
8. Nunoo S., Manu J., Owusu-Akyaw FKB, Nyame FK. Impact of artisanal small-scale (gold and diamond) mining activities on the Offin, Oda and Pra rivers in Southern Ghana, West Africa: A scientific response to public concern. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, No. 12. Article e12323. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12323.
9. Zhang L., Xu Z., Sun Y., Gao Y., Zhu L. Coal Mining Activities Driving the Changes in Microbial Community and Hydrochemical Characteristics of Underground Mine Water. *Int J Environ Res Public Health*. 2022. Vol. 19, No. 20. Article 13359. doi: 10.3390/ijerph192013359.
10. Ayiwouo M. N., Yamgouot F. N., Ngueyep Mambou L. L., Kingni S. T., Ngounouno I. Impact of gold mining on the water quality of the lom river, Gankombol, Cameroon. *Heliyon*. 2022. Vol. 8, No. 12. Article e12452. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12452.
11. Northey S. A., Mudd G. M., Werner T. T., Jowitt S. M., Haque N., Yellishetty M., Weng Z. Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 135. P. 1098–1116. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.024>.
12. Гаврилюк Р. Б., Логвиненко О. І., Негода Ю. О. Оцінка впливу розробки кар'єрів на підземні води в межах Українського щита в контексті оцінки впливу на довкілля (на прикладі Вирівського гранітного кар'єру). *Збірник наукових праць Інституту геологічних наук НАН України*. 2024. Том 17, Вип. 1. С. 93–108. <https://doi.org/10.30836/igs.2522-9753.2024.308419>.
13. Валерко Р. А., Бондарчук В. М., Кірейцева Г. В. Гідрохімічний моніторинг річки Тетерів у межах питного водозабору міста Житомир. *Екологічна безпека та технології захисту довкілля*. 2025. № 7. С. 3-11. <https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202507-01>.

Дата першого надходження рукопису до видання: 28.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ПЕРЕБІГ ООГЕНЕЗУ ГІРЧАКА ЄВРОПЕЙСЬКОГО *RHODEUS AMARUS* (BLOCH, 1782) ЗАПОРІЗЬКОГО (ДНІПРОВСЬКОГО) ВОДОСХОВИЩА

Єрух М.М., Маренков О.М.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Науки, 72, 49045, м. Дніпро
yerukhnikolay@gmail.com, gidrobions@gmail.com

У статті наведено результати комплексного дослідження перебігу оогенезу гірчака європейського *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782), риби з родини ахейлогнатових (Acheilognathidae), в природних умовах Запорізького (Дніпровського) водосховища. Метою даної роботи було дослідження особливостей перебігу оогенезу на основі прижиттєвих та гістоморфологічних досліджень ікри риби. Зокрема, визначення нормальної гістологічної картини розвитку гонад та статевих клітин на різних стадіях розвитку та встановлення морфометричних параметрів ооцитів. Вперше охарактеризовано повний цикл дозрівання яйцеклітин у самиць гірчака європейського в природному середовищі. Проведено морфометричний аналіз ооцитів на різних стадіях розвитку – від початку вакуолізації до завершення вітелогенезу та овуляції. Дослідження проводили у рамках базового фінансування науково-дослідних робіт із використанням сучасних іхтіологічних методик. Встановлено асинхронність гаметогенезу, що є типовою ознакою для видів з порційним нерестом. Особливу увагу приділено будові *zona radiata* – оболонки ооцитів, адаптованої до прикріплення ікри гірчака всередині мантийної порожнини двостулкових моллюсків, у яких відбувається інкубація. Описано характерні мікроструктурні особливості оболонки, зокрема наявність клейкого гелеподібного шару та ворсинчастих виростів. За результатами прижиттєвих спостережень виявлено випадки аномального розвитку статевих клітин – зокрема формування двоядерних незапліднених яйцеклітин, що може свідчити про порушення мейозу або вплив негативних екологічних чинників. Отримані результати мають важливе значення для репродуктивної біології риби, а також можуть бути використані в програмах екологічного моніторингу та збереження біорізноманіття прісноводних екосистем України. **Ключові слова:** риби, коропові, водосховище, оогенез, *zona radiata*, двоядерні ооцити, гістологія, гонади, вакуолізація, ікра, морфометрія.

The European bitterling *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782) oogenesis dynamic in the Zaporizke (Dniprovsk) Reservoir. Yerukh M., Marenkov O.

The article presents the results of a comprehensive study on the oogenesis of the European bitterling *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782), a fish belonging to the Acheilognathidae family under the natural conditions of the Zaporizke (Dniprovsk) reservoir. The aim of this work was to study the features on the oogenesis based on both intravital and histomorphological analyses of fish eggs. In particular, to determine the normal histological pattern of gonad and germ cell development at different stages of development and to establish morphometric parameters of oocytes. The full cycle of oocyte maturation in female of the European bitterling in the wild is described for the first time. A morphometric assessment of oocytes at various developmental stages – from the onset of vacuolization to the completion of vitellogenesis and ovulation – was performed. The work was carried out within the framework of basic funding for research works using modern ichthyological methods. The asynchronous nature of gametogenesis was confirmed, which is a typical feature of species with fractional spawning. Special attention is given to the structure of the *zona radiata*, the oocyte envelope adapted for attachment bitterling eggs within the mantle cavity of bivalve mollusks where incubation occurs. Characteristic microstructural features of the membrane are described, including the presence of an adhesive gel-like layer and villous projections. Intravital observations revealed cases of abnormal gamete development – specifically, the formation of binucleated unfertilized oocytes, which may indicate meiotic disruption or the influence of adverse environmental factors. The obtained results are of great importance for the reproductive biology of fish and can be applied in ecological monitoring programs and biodiversity conservation efforts in freshwater ecosystems of Ukraine. **Key words:** fish, cyprinids, reservoir, oogenesis, *zona radiata*, binucleated oocytes, histology, gonads, vacuolization, eggs, morphometry.

Постановка проблеми. Попри значну увагу до екології розмноження гірчака при моніторингових дослідженнях водойм, особливості перебігу оогенезу виду лишаються недостатньо вивченими. Клітинні механізми оогенезу у гірчака європейського у водоймах України раніше фактично не досліджувалися, що зумовило актуальність даного дослідження. Саме через це метою даної роботи було дослідження особливостей перебігу оогенезу гірчака європейського *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782) в умовах Запорізького (Дніпровського) водосховища. Зокрема, визначення нормальної гістологічної картини розвитку гонад та

статевих клітин на різних стадіях розвитку та встановити морфометричні параметри ооцитів.

Актуальність дослідження. Дослідження репродуктивних особливостей гірчака європейського *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782) та вивчення його адаптації до зміни умов існування мають важливе теоретичне і практичне значення в контексті збереження цього виду як такого, що підлягає охороні в ЄС згідно до переліку видів із третього додатку Бернської конвенції [1] та Резолюції 6 цієї ж конвенції [2], а також Директиви 92/43/ЄЕС про охорону природних середовищ існування, дикої флори

та фауни, як виду, що становить особливий інтерес для ЄС [3]. Одним із важливих аспектів дослідження репродуктивних особливостей є вивчення нормальної гістологічної картини розвитку гонад та статевих продуктів у організмі виду в умовах Запорізького (Дніпровського) водосховища.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проводили в межах базового фінансування науково-дослідних робіт Міністерством освіти і науки України «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Біологія та охорона здоров'я» Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара» (договір № БФ/6-2021 від 01.06.2021 року, номер державної реєстрації: № 0122U000059).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Гірчак європейський *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782) – прісноводна риба, що відноситься до родини ахейлогнатових (Acheilognathidae), статевозрілі особини зазвичай мають довжину близько 4–7 см [4]. Це доволі розповсюджений та чисельний в Запорізькому (Дніпровському) водосховищі вид, що відомий завдяки своїй цікавій репродуктивній поведінці, тісно пов'язаний із прісноводними двостулковими моллюсками [5, 6, 7, 8].

Нерест парний. Перед нерестом самки, з подовженими яйцекладами, залучені самцями, оглядають обраних самцями моллюсків, займаючи так звану «оглядову позу» (під кутом приблизно 75° до вихідного сифона моллюска) [9]. Потім самка випускає порцію від однієї до шести ікринок (за один акт нересту) [10, 11, 12, 13] через м'язовий конічний орган до базального отвору подовженого яйцекладу, за яким накопичується сеча. Різко змінюючи положення самка вводить конічний орган у отвір вихідного сифону моллюска та, стискаючи конічний орган, відкладає до мантийної порожнини моллюска ікринки, проштовхуючи їх сечею під тиском по яйцекладу. Яйцеклад під тиском сечі твердіє і розгортається до мантийної порожнини моллюска. При цьому самці можуть випускати сперму через вхідний сифон моллюска для запліднення ікри як до, так і одразу після зустрічі з самкою [9].

Через те, що наявність у водоймі певних видів моллюсків (частіше з родів *Unio*, *Anodonta* і *Dreissena*) завжди є критичною умовою для проходження нересту [5, 6, 7, 8], гірчака можна використовувати як об'єкт для вивчення еволюційної та поведінкової біології риб [14, 15], зокрема, як модель для вивчення симбіотичних відносин між рибами та моллюсками, та як вид-індикатор стану біоценозів [16].

Нерест гірчака порційний, масовий нерест відбувається з кінця квітня і може тривати до початку серпня, проте часто залежить від температури води та визначається фотоперіодом [17, 18]. За нерестовий сезон при сприятливих умовах самка здатна відкласти у сумі понад кількості ікринок, хоча інди-

відуальна плодючість оцінюється в межах від 100 ікринок до 500 ікринок в залежності від віку та вгодованості (маси) [9, 19].

Статева структура популяції в Запорізькому (Дніпровському) водосховищі: в червні 2024 р. співвідношення самців до самок становило 1:3, спостерігали домінування самок, відсоток яких сягав 75,93 % від загального числа особин в уловах; в серпні того ж року співвідношення самців та самок становило як 1:2.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. В Україні під час дослідження іхтіофауни мало уваги приділяється вивченню репродуктивних особливостей видів, зокрема, гірчака європейського. Зазвичай в роботах вказується наявність виду в іхтіологічних пробах або вказується чисельність та біомаса виду у водоймі, подекуди надається інформація про біологічні показники виду [20, 21, 22].

При аналізі літератури присвяченій питанням відтворення гірчака ряд авторів надають показники плодючості та вказують величини гонадо-соматичного індексу (ГСІ), зазвичай без проведення гістологічних досліджень, що на нашу думку вкрай важливо для розуміння репродуктивної біології виду та проведенні екологічного моніторингу. Саме вивчення нормальної гістологічної картини розвитку гонад та статевих клітин, а також резорбційних процесів у організмі виду в умовах Запорізького (Дніпровського) водосховища присвячена дана наукова робота.

Новизна. Уперше визначено нормальну гістоморфологічну картину розвитку гонад та статевих клітин у організмі самиць гірчака європейського в природних умовах України на прикладі Запорізького (Дніпровського) водосховища. Встановлено морфологічні закономірності дозрівання ооцитів та підтверджено асинхронність перебігу гаметогенезу, характерну для риб, які відкладають ікру порційно.

Методологічне або загальнонаукове значення. Матеріалом для дослідження слугували статевозрілі самиці гірчака європейського *R. amarus* (Bloch, 1782), виловлені на літоральних ділянках Запорізького (Дніпровського) водосховища у весняно-осінній період 2024 року. Риб відловлювали десятиметровим мальковим неводом з капронової делі, з кроком вічка 4 мм. Відбір проб проводили на наступних ділянках: о. Монастирський (48°46040 N, 35°08086 E; 48°45950 N, 35°08456 E), с. Одиноківка (Самарська затока Запорізького (Дніпровського) водосховища, 48°50602 N, 35°18871 E), с. Старі Кодакі (48°37608 N, 35°14858; 48°36553 N, 35°14774 E), с. Військове (48°17720 N, 35°17014 E).

Біологічний аналіз риб здійснювали згідно загальноприйнятих класичних іхтіологічних методик [23]. Гірчаків розподіляли за віковими класами, підраховували кількість особин кожної вікової групи, визначали стать особин. Вимірювання проводили з точні-

стю до 1 мм. Масу визначали з точністю до 0,01 г.

Біологічному аналізу піддавалися статевозрілі трилітки (2+) самиць гірчака. Середньовиважена промислова довжина самиць гірчака (2+) становила $5,04 \pm 1,91$ см, маса – $2,96 \pm 0,34$ г.

Ікринки риб аналізували як прижиттєво, так і з використанням гістологічних зрізів. Для гістоморфологічної оцінки стану статевих клітин самиць риб проводили прижиттєвий відбір яйцеклітин. Ікринки вилучали із живих щойно виловлених самиць. Яйцеклітини отримували шляхом легкого стискання черевної стінки для отримання ікри, якщо ікринки були вільні в порожнині яйцепроводу, але таким способом можна отримати лише зрілі ікринки, готові до запліднення. Для дослідження ікринок інших стадій їх відбирали шляхом розтину черевної порожнини самиць з вилученням ікри з яєчника за допомогою пінцета або скальпеля. Ікринки переносили на предметне скло в краплині води (або фізіологічного розчину 0,9 % NaCl). Накривали покривним склом, уникаючи надмірного стискання.

Отримані клітини одразу досліджували під світловим мікроскопом MICROmed Fusion FS-7620 (MICROmed, Китай, 2024) у нативному вигляді для збереження клітинних структур та компонентів жовтка.

Для проведення гістоморфологічних аналізів яєчників риб фіксували у 4 %-му розчині формаліну, а потім в лабораторії виготовляли гістологічні зрізи яєчників для мікроскопії. Для виготовлення зрізів яєчників використовувалися мікротом «Thermo scientific microm HM 325» та «MZP-01 Tehnom». Отримані зрізи фарбували гематоксилін-еозином [24]. Пофарбовані гістологічні препарати досліджували за допомогою мікроскопу MICROmed Fusion FS-7620 (MICROmed, Китай, 2024) та фотографували цифровою USB-камерою адаптером для мікроскопа SIGETA M3CMOS 25000 (25.0 MP, виробник: SIGETA, Україна/Китай, 2023). Для опису клітин використовували атласи гістології риб [25, 26, 27].

Цитометричний аналіз розмірів статевих клітин проводили з точністю до 0,01 мкм за допомогою програмного забезпечення ToupView v. 3.5 (ToupTek Photonics, Китай).

Всі роботи з дослідними тваринами виконували згідно правил біоетики із дотриманням Європейської Конвенції «Про гуманне ставлення до лабораторних тварин», «Загальних принципів експериментів на тваринах» та відповідно до «Положення про використання тварин в біомедичних експериментах» [28, 29, 30]. Локальний комітет – Біоетичний комітет біолого-екологічного факультету ДНУ протокол № 3 від 10.04.2024 року.

Цифрові дані обробляли за допомогою програмних пакетів Microsoft Excel 2010 (Microsoft Corporation, США) та Statistica 6.0 (StatSoft Inc., США). за методами статистики.

Виклад основного матеріалу. При прижиттєвому дослідженні ікринок досить ефективно виявляли ядро, жовткові включення та структуру оболонки ікринки (zona radiata). При аналізі яйцеклітин ядро виявляли як світлу або слабо забарвлену структуру у центрі або на периферії клітини (рис. 1.); zona radiata – як помітну щільну шарувату структуру оболонки ікринки. Жовткові включення відмічали у вигляді гранул або сферичних тіл різної щільності; при високому збільшенні можна було ідентифікувати жовткові пластинки.

За такого дослідження можна виявляти аномалії розвитку яйцеклітин – наприклад, фіксувати наявність двох ядер як ознаки порушення оогенезу або патології дозрівання яйцеклітини, фрагментації жовтка, несиметричності оболонки тощо.

У більшості риб зріла незапліднена ікра перебуває на стадії метафази другого мейотичного поділу. Під час дозрівання ооциту його велике ядро зміщується до периферії яйцеклітини. Ооцити риб переважно однадерні; двоядерні яйцеклітини зустрічаються вкрай рідко. При дослідженні нативних препаратів ікринок гірчака нами виявлено випадок появи двоядерного ооциту (рис. 2).

Така аномалія може проявитися по-різному: іноді спостерігають два ядерця в незрілому ооциті, або ж два пронуклеуси у вже дозрілій, але незаплідненій ікринці. Важливо відрізнити справжню двоядерність від нормальних структур: наприклад, у риб на ранніх стадіях оогенезу в одному ядрі можуть бути численні ядерця (нуклеолі), розташовані по периферії, але це одне ядро. Натомість двоядерний ооцит має саме дві окремі ядерні оболонки в спільній цитоплазмі.

Такі ооцити зазвичай бувають аномально великими (гігантськими) через злиття цитоплазми двох клітин або утримання подвійного набору хромосом. Вони не здатні до нормального розвитку і при заплідненні дають нежиттєздатні ембріони (наприклад, триплоїдії) [31]. Отже, у риб двоядерна ікринка вважається відхиленням від норми і, як правило, не здатна дати здорове потомство.

Існує кілька механізмів, які можуть призвести до виникнення двоядерної яйцеклітини ще до запліднення. Найпоширеніша причина – збій у процесі мейозу, коли ядерний матеріал неправильно розподіляється. Наприклад, якщо перше полярне тільце не відокремилось належним чином, або його ядро реінтегрувалось назад в ооцит, у клітині залишаться два гаплоїдних ядра замість одного. Така незапліднена двоядерна ікринка, що виникла через мейотичну помилку, зазвичай залишається нерозвиненою і деградує. Наявність паразитів або патологічних процесів в яєчнику може призводити до мультіядерності. Найяскравіший приклад – паразит *Polypodium* в ооцитах осетрових, у яких заражений ооцит практично містить сторонню двоядерну клітину [32].

Забруднення водой важкими металами, пестицидами, ендокринними деструкторами може викли-

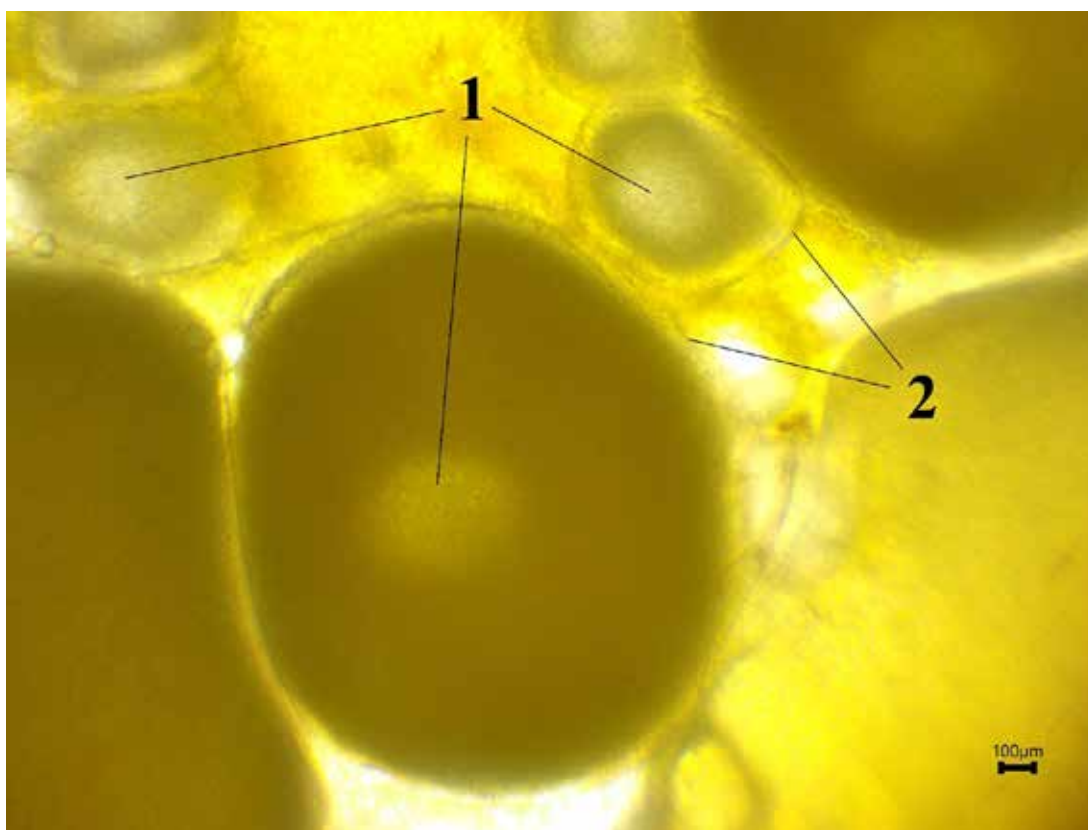


Рис. 1. Нативний препарат ікринок гірчака європейського
1 – ядро, 2 – фолікулярна оболонка. Масштабна лінійка = 100 µm (зб. 40х)

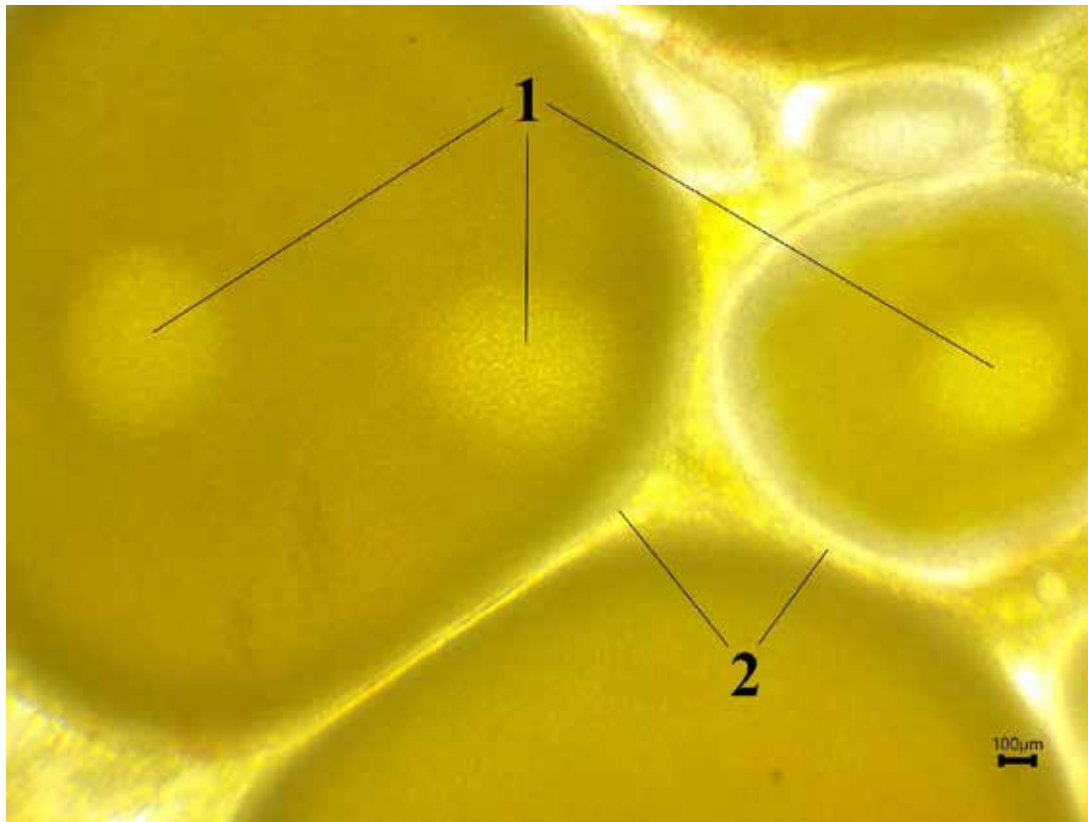


Рис. 2. Двоядерна (зліва) та одноподерна (справа) ікринки гірчака
1 – ядро, 2 – фолікулярна оболонка. Масштабна лінійка = 100 µm (зб. 40х)

кати генетичні і цитологічні аномалії у статевих клітинах риб. Доведено, що полютанти індукують різні ядерні аномалії у клітинах риб, наприклад, появу мікроядер, фрагментацію хромосом, а також двоядерність клітин [33].

Зазвичай це спостерігається на соматичних клітинах (еритроцитах, зябровому епітелії) як індикатор цитотоксичності, але подібні ушкодження можуть торкатися і ооцитів [33]. Токсини здатні порушувати веретено поділу або пошкоджувати ДНК, що може призводити до неповного поділу ядра. Наприклад, підвищений вміст важких металів корелює з оваріальними деформаціями і ознаками апоптозу в гонадах риб [34].

Вищезазначені чинники зрештою зводяться до того, що двоядерний ооцит – це наслідок збою нормального перебігу оогенезу. Він може бути спричинений внутрішніми (генетичними або клітинними) порушеннями або зовнішніми (паразити, токсини, радіація тощо) чинниками. Наявність двох ядер у незаплідненій яйцеклітині однозначно розцінюється як відхилення від нормального розвитку ооциту. У межах норми зріла ікринка має лише один гаплоїдний набір хромосом і, відповідно, не більше одного ядра (пронуклеуса). Двоядерність вказує на порушення механізмів клітинного поділу. З точки зору біології розвитку, така ікра не виконує своєї функції – вона

або не запліднюється взагалі, або при заплідненні дає нежиттєздатний ембріон.

Zona radiata – це оболонка, що оточує ооцит у кісткових риб (Teleostei), яка формується під час вітеллогенезу між плазмалею ооцита та фолікулярним шаром ікринок. Під мікроскопом zona radiata часто має характерну радіальну посмугованість, зумовлену наявністю порових каналців – дрібних каналів, що пронизують оболонку. Через ці пори мікроворсинки ооциту та відростки фолікулярних клітин контактують між собою, забезпечуючи живлення й сигнальний обмін під час оогенезу [35]. Функціонально zona radiata відіграє ключову роль у захисті ікри та процесі запліднення. Міцна волокниста структура zona radiata служить механічним захистом яйця від фізичних ушкоджень, а її щільний зовнішній шар перешкоджає хімічним агентам і патогенам проникати до ембріона

Гістологічно zona radiata добре розрізняється на зрілих ооцитах: під час росту яйцеклітини вона відкладається у вигляді гомогенного шару, що поступово потовщується впродовж вітеллогенезу. При аналізі свіжих ікринок під світловим мікроскопом внутрішня зона виглядала радіально посмуговою (через порові каналці), тоді як зовнішня – більш темна і тонка (рис. 3).

Гістологічні дослідження близького виду гірчака амурського *Rhodeus sericeus* (який раніше вважали

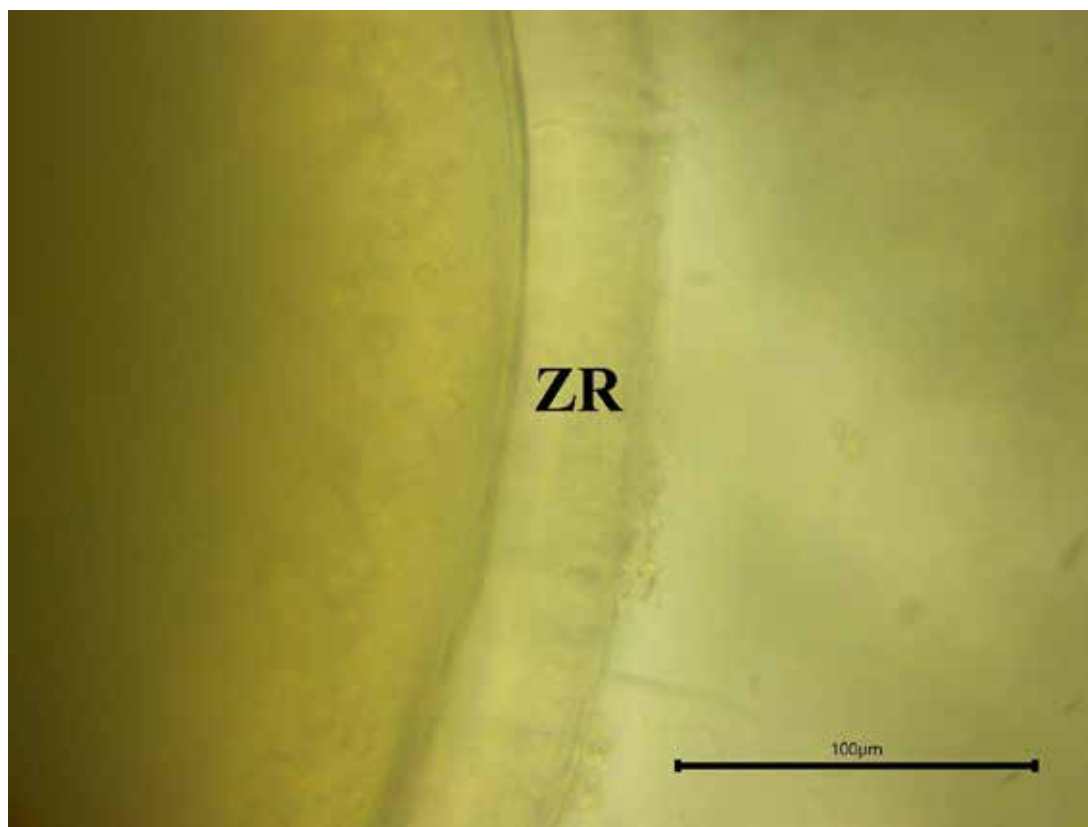


Рис. 3. Zona radiata (ZR) ооцитів ікринок гірчака європейського (нативний препарат)
Масштабна лінійка = 100 μm (зб. 400x)

підвидом *R. amarus*) показали, що *zona radiata* у гірчака відносно тонка порівняно з іншими коропами [36]. Зовнішній край оболонки ооциту у гірчака має специфічний гелеподібний шар: у базальній частині присутній щільний драглистий (желатиноподібний) матеріал, який виконує функцію “клею” для прикріплення ікринок всередині двостулкового моллюска (рис. 4).

Отже, ікринка гірчака європейського мала клейку оболонку, що фіксує її на внутрішній стороні зябер двостулкового моллюска. Ця адаптація є надзвичайно важливою, адже ікринки повинні утримуватися в мантийній порожнині моллюска протягом періоду інкубації, витримуючи потік води, що пропускається через зябра. Завдяки клейкій драглистій основі яйцеклітина гірчака міцно прикріплюється до зябрових пластинок і не вимивається, навіть коли моллюск частково відкриває стулки.

Окрім клейкого шару, оболонка ікринки гірчака має й інші особливості – поверхня *zona radiata* вкрита численними мікроворсинками та виростами. Ворсинки і нитки на поверхні оболонки ймовірно сприяють кращому утриманню ікринки між зябровими пластинками моллюска-хазяїна, діючи як мікроякорі в тканині зябра. Крім того, збільшення площі поверхні оболонки за рахунок ворсинок може покращувати газообмін, що критично в умовах відносно замкнутого простору всередині моллюска.

Згідно з порівняльним аналізом корейських видів гірчаків, у всіх видів *Rhodeus* зовнішня поверхня *zona radiata* формує «волосисту» структуру – густо вкрита масивними ворсинчастими виростами [37].

При дослідженні гістологічних зрізів встановлено, що в процесі дозрівання для різних генерацій яйцеклітин гірчака європейського характерний асинхронний розвиток – одночасно зустрічалися ооцити різних стадій розвитку (рис. 5.).

Перехід ооцитів гірчака з фази одношарового фолікула (фаза C) в фазу початку вакуолізації (фаза D₁) відбувався асинхронно.

У фазі D₁ на початку вакуолізації, ооцити мали середній діаметр $226,19 \pm 13,23$ мкм, ядро мало діаметр $79,99 \pm 5,14$ мкм. Вакуолі яйцеклітин дрібні та розподілені тонким шаром по периметру ооцитів, середній діаметр їх складав $6,72 \pm 1,32$ мкм.

У фазі D₂ процес вакуолізації продовжувався у напрямку до ядра, діаметр вакуолей у середньому складав $9,55 \pm 0,82$ мкм. Діаметр ооцитів при цьому складав $360,67 \pm 18,68$ мкм, ядро мало діаметр $89,74 \pm 1,33$ мкм.

Наприкінці фази D кількість вакуолей поступово зростала, досягаючи максимуму. У фазі D₃ вакуолі яйцеклітин дрібні та рівномірно розподілені по усій площі ооцитів, середній діаметр їх складав $10,78 \pm 1,05$ мкм. Діаметр самого ооциту при цьому складав



Рис. 4. Гістологічна картина будови оболонки зрілого ооциту гірчака

ZR – zona radiata, 2 – фолікулярна оболонка. Масштабна лінійка = 100 μm (зб. 400x)



Рис. 5. Асинхронний розвиток ооцитів гірчака: фаза C – ооцити у фазі одношарового фолікула; фаза D₁ – ооцити на початку вакуолізації; фаза D₂ – продовження вакуолізації у напрямку до ядра
ZR – zona radiata, 1 – ядро. Масштабна лінійка = 100 μm (зб. 100x)

449,53 ± 22,59 мкм. Ядро виражене, мало діаметр 99,26 ± 4,95 мкм, товщина оболонки ооцитів (zona radiata) становила 10,58 ± 2,89 мкм.

Площі яйцеклітин поступово збільшуються, від фази D₁ (початок вакуолізації) до фази D₃, коли уся цитоплазма до ядра була заповнена вакуолями, та варіюють – від 35,29 тис. мкм² до 178,89 тис. мкм².

У фазі E посилюється вітелогенез (процес синтезу та накопичення поживних речовин), та спостерігається збільшення яйцеклітин за рахунок накопичення гранул жовтка (рис. 6).

В даній фазі вакуолі досягають свого максимального розміру та перестають збільшуватись. Діаметр вакуолей складав у середньому 11,94 ± 0,99 мкм. Середній діаметр ооцитів при цьому складав 541,47 ± 52,07 мкм. Ядро виражене, мало діаметр 135,78 ± 12,86 мкм, Площі ооцитів варіювали від 181,48 тис. мкм² до 350,78 тис. мкм².

Наприкінці фази E кількість вакуолей дещо зменшується за рахунок їх злиття та подальшого накопичення у цитоплазмі ооциту гранул жовтка, що заміщує вакуолі. Також відмічено, що товщина оболонки (zona radiata) збільшується, у порівнянні із попередньою фазою, і становить у фазі E у середньому 14,64 ± 4,48 мкм.

У фазі F ооцити готові до овуляції та сягають своїх дефінітивних розмірів. Під час дозрівання відбувається зміщення ядра до периферії ооциту та

масове злиття вакуолей, що бере початок ближче до протилежного від ядра полюсу. При цьому окремі вакуолі, що не зливалися мали середній діаметр 13,25 ± 1,5 мкм. Середній діаметр ооцитів цієї фази складав 772,3 ± 4,28 мкм, ядро мало діаметр – 159,71 ± 5,48 мкм (рис. 7).

Варто зазначити, що збільшення вакуолей, у порівнянні із фазою E, не спостерігали, а незначна відмінність у параметрах пояснюється тим, що частина вакуолей зливається. Також відмічено, що товщина оболонки (zona radiata) збільшується, у порівнянні із попередньою фазою, і становить 25,22 ± 11,15 мкм.

В цей час, за сприятливих умов, розпочинається нерест гірчака. Зазвичай масовий нерест відбувається з кінця квітня і може тривати до початку серпня, хоча ми зустрічали самок із подовженими яйцекладами до кінця вересня. Восени за настання зниження температури води, нерест припиняється, а ікринки, що не було відкладено в цьому сезоні піддаються резорбції.

Головні висновки. Проведене дослідження дозволило охарактеризувати повний цикл оогенезу у гірчака європейського (*Rhodesus amarus*) в умовах Запорізького (Дніпровського) водосховища, з акцентом на морфологічні, гістологічні та морфометричні особливості розвитку ооцитів. Встановлено асинхронність дозрівання яйцеклі-

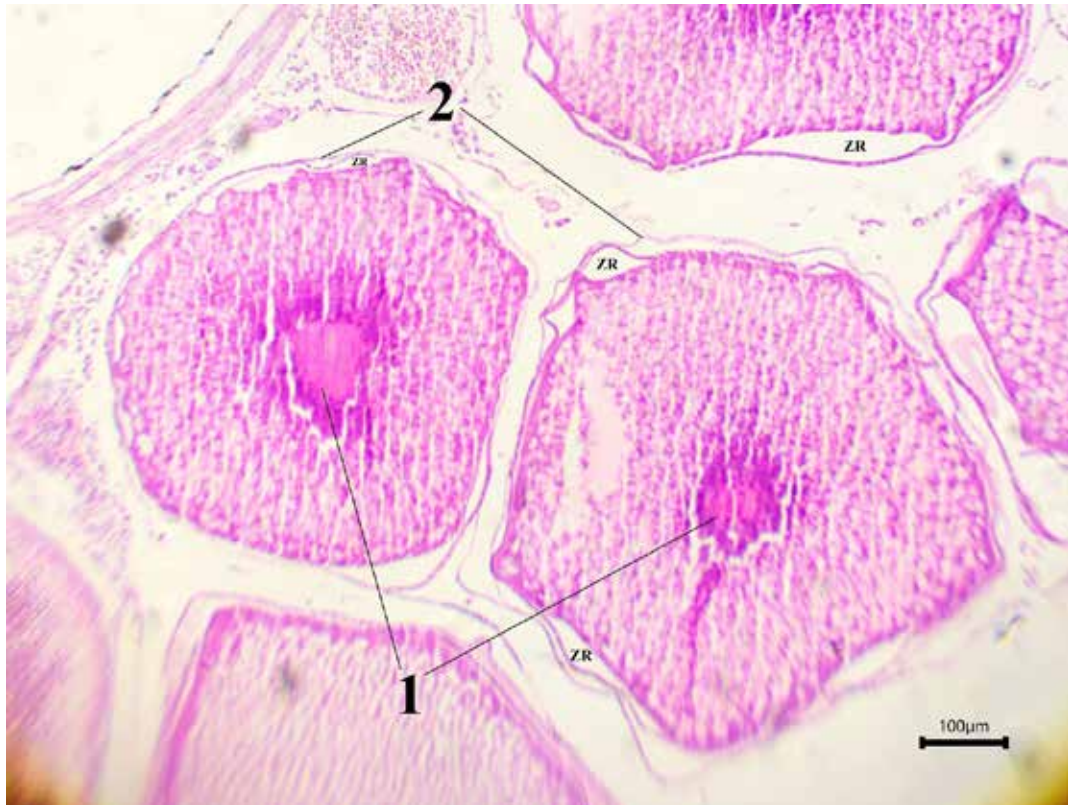


Рис. 6. Ооцити гірчака європейського у фазі D_3 (зліва) та у фазі E (справа)
ZR – zona radiata, 1 – ядро, 2 – фолікулярна оболонка. Масштабна лінійка = 100 μm (зб. 100х)



Рис. 7 Ооцит у фазі F, помітно злиття вакуолей
ZR – zona radiata, 1 – ядро, 2 – фолікулярна оболонка. Масштабна лінійка = 100 μm (зб. 100х)

тин, притаманну порційно нерестуючим видам, а також виявлено порушення у перебігу оогенезу, зокрема формування двоядерних ооцитів. Ці дані розширюють уявлення про репродуктивну біологію риб.

1. Встановлено повну гістологічну картину перебігу оогенезу гірчака європейського, включно з фазами вакуолізації, вітелогенезу та дозрівання ооцитів. Визначено морфометричні параметри яйцеклітин на кожній стадії.

2. Підтверджено, що розвиток статевих клітин у самиць *R. amarus* є асинхронним, що відповідає порційній стратегії нересту й дозволяє тривале відкладання ікри протягом сезону.

3. Зафіксовано випадок двоядерної яйцеклітини, що може свідчити про порушення мейозу або вплив негативних чинників середовища. Такі ооцити потенційно непридатні до розвитку.

4. Встановлено морфологічні особливості *zona radiata*, включаючи наявність ворсинок і клейкого шару, які забезпечують прикріплення ікринки до зябер моллюска-хазяїна під час інкубації.

Перспективи використання результатів дослідження. Дані морфометричних показників мають практичну цінність для опису біології виду і для порівняння із аналогічними дослідженнями та даними лабораторних експериментів. Крім того, відхилення від звичайного розвитку ооцитів можна розглядати як маркер екологічних змін у середовищі.

У подальших дослідженнях доцільним є розширення географії досліджень – вивчення перебігу оогенезу *Rhodeus amarus* в інших водоймах України, зокрема в умовах різного кліматичного та гідрохімічного режимів, для виявлення потенційної пластичності процесу дозрівання гонад. Провести порівняльний аналіз між популяціями – дослідити гістологічні та морфометричні особливості яйцеклітин гірчака з різних водойм з метою виявлення адаптивних відмінностей та впливу локальних екологічних чинників.

Також для реалізації заходів з реінтродукції гірчака звичайного в інші водойми, як виду внесеного до Додатку 3 Бернської конвенції варто розробляти і впроваджувати конструкції штучних нерестовищ.

Література

1. Holčík J., Jedlička L. Geographical variation of some taxonomically important characters in fishes: the case of the bitterling *Rhodeus sericeus*. *Environmental Biology of Fishes*. 1994. 41(1-4), 147-170.
2. Годлевська О. В., Фесенко Г. В. Фауна України: охоронні категорії : довідник. Вид. 2-ге, переробл. і допов. Київ, 2010. 80 с.
3. Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. An official website of the European Union. URL: <http://data.europa.eu/eli/dir/1992/43/oj> (дата звернення: 22.07.2025).
4. Benzer S., Gül A. Biological properties of European bitterling *Rhodeus amarus* (Bloch, 1782) in Dinsiz Stream, Turkey. *Acta Aquatica: Aquatic Sciences Journal*. 2020. 7(2), 60-64.
5. Anil A. N., Mehdi I., Douda K., Smith C., Reichard, M. Reciprocal transplant experiments demonstrate a dynamic coevolutionary relationship between parasitic mussel larvae and bitterling fishes. *Freshwater Biology*. 2024. 69(11), 1525-1536.
6. Halabowski D., Reichard M., Pyrzanowski K., Zięba G., Grabowska J., Smith C., Przybylski, M. The depressed river mussel *Pseudanodonta complanata* as an occasional host for the European bitterling *Rhodeus amarus*. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*. 2024. 425, 3.
7. Halabowski D., Pyrzanowski K., Zięba G., Grabowska J., Przybylski M., Smith C., Reichard M. The impact of invasive *Sinanodonta woodiana* (Bivalvia, Unionidae) and mussel macroparasites on the egg distribution of parasitic bitterling fish in host mussels. *Scientific Reports*. 2025. 15(1), 9417.
8. Marčić Z., Prenz P., Horvatić S., Mustafić P., Zanella D., Čaleta M., Lajtner J. Is bitterling (*Rhodeus amarus* (Bloch, 1782)) threatened by the invasive unionid species *Sinanodonta woodiana* (Lea, 1834). *Biological Invasions*. 2024. 26(10), 3417-3431.
9. Smith C., Reichard M., Jurajda P., Przybylski M. The reproductive ecology of the European bitterling (*Rhodeus sericeus*). *Journal of Zoology*. 2004. 262(2), 107-124.
10. Ecological Risk Screening Summary European Bitterling (*Rhodeus amarus*). URL : <https://www.fws.gov/sites/default/files/documents/Ecological-Risk-Screening-Summary-European-Bitterling.pdf> (дата звернення : 22.07.2025).
11. Reichard M., Ondračková M., Bryjová A., Smith C., Bryja J. Breeding resource distribution affects selection gradients on male phenotypic traits: experimental study on lifetime reproductive success in the bitterling fish (*Rhodeus amarus*). *Evolution*. 2009. 63(2), 377-390.
12. Konečná M. Reproduction mode of European Bitterling (*Rhodeus amarus*, Bloch, 1782) determined through rapid oocyte counts and size determination using digital imaging. *Journal of Applied Ichthyology*. 2012. 28(5), 806-810.
13. Labecka A.M., Reichard M. The reproductive costs of bitterling fish and zebra mussel parasitism to a unionid mussel. *Aquaculture*. 2025. 595, 741515.
14. Mills S.C., Reynolds J.D. Operational sex ratio and alternative reproductive behaviours in the European bitterling, *Rhodeus sericeus*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 2003. 54, 98-104.
15. Smith C., Spence R., Bailey R., Reichard M. Male position in a sexual network reflects mating role and body size. *Journal of Vertebrate Biology*. 2023. 72(22069), 22069-1.
16. Kujawa R., Piech P. Rearing of bitterling (*Rhodeus amarus*) larvae and fry under controlled conditions for the restitution of endangered populations. *Animals*. 2021. 11(12), 3534.
17. Reichard M., Jurajda P., Smith C. Male-male interference competition decreases spawning rate in the European bitterling (*Rhodeus sericeus*). *Behavioral ecology and Sociobiology*. 2004. 56, 34-41.

18. Tarkan A.S., Gaygusuz Ö., Gürsoy Ç., Acipinar H. Life history pattern of an Eurasian Cyprinid, *Rhodeus amarus*, in a large drinking-water system (Ömerli Dam Lake-Istanbul, Turkey). *Journal of Black Sea/Mediterranean Environment*. 2005. 11(2), 205-224.
19. Smith C., Reynolds J.D., Sutherland, W.J. Population consequences of reproductive decisions. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 2000. 267(1450), 1327-1334.
20. Котовська Г.О. Сукцесії в угрупованнях цьоголіток риб Кременчуцького водосховища різних біоекологічних груп і промислових категорій. Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Біологія. Екологія. 2007. Вип. 15 (1). С. 70-77.
21. Ретроспективний огляд формування іхтіокомплексу р. Оріль. / Кочет В.М., Христов О.А., Марченкова Ю.А., Бондарев Д.Л. Вісник Дніпропетровського університету. Сер. Біологія. Екологія. 2011. Вип. 19. С. 76-85.
22. Куцоконь Ю.К., Романь А.М., Щербатюк М.М. Сучасний склад рибного населення НПП Гетьманський Вісник Черкаського університету. Сер. «Біологічні науки». 2022. № 2. С. 46-52.
23. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / Арсан, О.М. та ін. ; за ред. В.Д Романенка. НАНУ : Ін-т гідробіології. Київ : Логос, 2006. 408 с.
24. Avwioro G. Histochemical uses of haematoxylin—a review. *Jpcs*. 2011. 1(5), 24-34.
25. Genten F., Terwinghe E., Danguy A. Atlas of fish histology. CRC Press. 2009. 224 p.
26. Kirschbaum F., Formicki K. The histology of fishes. CRC Press. 2020. 456 p.
27. Mokhtar D.M. Fish histology: from cells to organs. Apple Academic Press. 2021. 442 p.
28. Khendel N.V. Rehla metatsia provedennia eksperymentiv nad tvarynamy: mizhnarodni ta natsionalni pravovi standarty. *Ukrainian Journal of International Law*. 2013. 71-76.
29. Directive 2010/63/EU of the European Parliament and of the Council of 22 September 2010 on the protection of animals used for scientific purposes (Text with EEA relevance) : Directive / Official Journal of the European Union L276/33. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/63/oj/eng> (дата звернення: 22.07.2025).
30. Положення про Комітет з питань етики (біоетики): Наказ Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України № 1287 від 19.11.2012 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1287736-12#n12>. (дата звернення: 22.07.2025).
31. Kang H.J., Rosenwaks Z. Triploidy – the breakdown of monogamy between sperm and egg. *International journal of developmental biology*. 2008. 52(5), 449.
32. Habil G.D., Holban E., Jawdhari A., Sadica I. Review on Polypodium Hydri forme Infestation of Sturgeon Eggs and Its Implications in Species Conservation. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences. 2023. Vol. 437, p. 02007.
33. Abass N.Y. The influence of heavy metals on cytotoxicity in *Tilapia zillii*. *Aquaculture International*. 2024. 32(7), 9079-9098.
34. Bera T., Kumar S.V., Devi M.S., Kumar V., Behera B.K., Das B.K. Effect of heavy metals in fish reproduction: A review. *Journal of Environmental Biology*. 2022. 43(5), 631-642.
35. Park C.W., Kim J.G. A Comparative Morphological Study on the Characteristics of Egg Envelopes of Three Cultrinae Fishes (Cyprinidae, Teleostei) in Korea. *Life*. 2024. 14(7), 840.
36. Khlopova A.V., Varaksin A.A. Structure of the ovipositor and ovary and the features of reproduction in Amur bitterling *Rhodeus sericeus* (Cyprinidae: Acheilognathinae). *Journal of Ichthyology*. 2011. 51(2), 198-208.
37. Choi S.J., Yun S.W., Park J.Y. Comparative Morphology of the Zona Radiata in Oocytes of Korean Bitterlings from the Genera *Rhodeus*, and *Acheilognathus* (Cyprinidae). *Journal of Ichthyology*. 2023. 63(4), 781-787.

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ЗАБРУДНЕНИХ НАФТОПРОДУКТАМИ

Ліненко Є.О., Нечипоренко Д.І., Шкоп А.О. Ліфер В.Є.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2 м. Харків, 61002

Yevhen.Linenko@mit.khpi.edu.ua, Dmytro.Nechyporenko@khpi.edu.ua,

Andrii.Shkop@mit.khpi.edu.ua, Valentyn.Y. Lifer@mit.khpi.edu.ua

Забруднення навколишнього середовища нафтою та нафтопродуктами залишається одним із найнебезпечніших проявів техногенного впливу людини на довкілля. В умовах активного розвитку промисловості, зростання інтенсивності транспортних перевезень, енергетичного виробництва та діяльності військово-промислового комплексу зростає кількість джерел забруднення, пов'язаних із витоками, аваріями або неналежною утилізацією продуктів нафтопереробки. Одним із критичних наслідків цього процесу є утворення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, які становлять серйозну загрозу для водних екосистем, ґрунтів та загального екологічного балансу.

Сучасні виклики, пов'язані з погіршенням стану водних об'єктів, зниженням якості питної води та деградацією природних ресурсів, вимагають переосмислення підходів до очищення стічних вод, особливо забруднених стійкими вуглеводнями. Це актуалізує необхідність впровадження інноваційних, екологічно орієнтованих технологій, які не лише ефективно видаляють забруднювальні речовини, а й не потребують подальшої утилізації шкідливих залишків, забезпечують мінімальне навантаження на довкілля та сприяють відновленню природних процесів самоочищення водних екосистем.

У статті представлено комплексний аналіз сучасних методів очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, принципи дії, ефективність та сфери застосування. Розглянуто фізичні (відстоювання, фільтрація, флотація), хімічні (коагуляція, окиснення, сорбція), біологічні (біодеградація, біосорбція) та комбіновані методи, що поєднують декілька підходів для досягнення вищої ефективності очищення. Проведено порівняльний аналіз технологій з урахуванням їх переваг і недоліків, а також можливості впровадження в системи централізованого та локального водоочищення.

Окрема увага приділена перспективним технологіям, які ґрунтуються на використанні природних сорбентів, біопрепаратів, наноматеріалів і мембранних фільтраційних систем. Визначено основні наукові та практичні напрямки подальших досліджень у галузі очищення нафтовмісних стоків, з урахуванням вимог сталого розвитку, економічної доцільності та екологічної безпеки. *Ключові слова:* нафтопродукти, стічні води, забруднення довкілля, методи очищення, екологічна безпека, водоочищення.

Comprehensive analysis of methods for treating wastewater contaminated with petroleum products. Linenko Ye., Nechyporenko D., Shkop A., Lifer V.

Pollution of the environment by oil and petroleum products remains one of the most dangerous manifestations of anthropogenic impact on ecosystems. With the rapid development of industry, the increasing intensity of transportation, energy production, and military-industrial activity, the number of pollution sources associated with leaks, accidents, and improper disposal of petroleum-derived products is growing. One of the critical consequences of this process is the formation of wastewater contaminated with petroleum products, which poses a serious threat to aquatic ecosystems, soil, and overall ecological balance.

Modern challenges related to the deterioration of water bodies, declining drinking water quality, and the degradation of natural resources require a rethinking of approaches to wastewater treatment, particularly in cases of contamination with persistent hydrocarbons. This highlights the need for the implementation of innovative, environmentally oriented technologies that not only effectively remove pollutants but also eliminate the need for further disposal of hazardous residues, reduce environmental pressure, and promote the restoration of natural self-purification processes in aquatic ecosystems.

The article presents a comprehensive analysis of current methods for treating wastewater contaminated with petroleum products, including their operating principles, effectiveness, and areas of application. The study examines physical (sedimentation, filtration, flotation), chemical (coagulation, oxidation, sorption), biological (biodegradation, biosorption), and combined methods that integrate multiple approaches to achieve higher treatment efficiency. A comparative assessment of the technologies is provided, considering their advantages, limitations, and potential for integration into centralized and decentralized water treatment systems.

Special attention is given to promising technologies based on the use of natural sorbents, biopreparations, nanomaterials, and membrane filtration systems. The article outlines key scientific and practical directions for further research in the field of petroleum-containing wastewater treatment, taking into account the principles of sustainable development, economic feasibility, and environmental safety. *Key words:* petroleum products, wastewater, environmental pollution, treatment methods, environmental safety, water purification.

Постановка проблеми. Забруднення водного середовища нафтопродуктами є серйозною екологічною проблемою, що набуває дедалі більшого масштабу у зв'язку з інтенсивним розвитком промисловості, транспорту, енергетики та зростанням техногенних аварій. Стічні води, забруднені нафто-

вими компонентами, є джерелом довготривалого токсичного впливу на водні екосистеми, ґрунти, а також на здоров'я людини. Потрапляння нафтопродуктів у навколишнє середовище призводить до порушення процесів саморегуляції в екосистемах, зниження біорізноманіття, зменшення якості води

та ґрунтів, а також ускладнює використання водних ресурсів у господарських і побутових цілях.

Попри існуючі технології очищення стічних вод, більшість із них не забезпечують повного видалення нафтових забруднювачів, або створюють додаткові екологічні ризики, пов'язані з утворенням залишкових відходів. Це зумовлює необхідність системного аналізу сучасних методів очищення, з урахуванням їх ефективності, екологічної безпеки, економічної доцільності та можливостей практичного впровадження.

У зв'язку з цим виникає потреба у комплексному підході до оцінки та порівняння різних методів очищення нафтовмісних стічних вод, що дозволить визначити найбільш перспективні й екологічно безпечні технології, здатні забезпечити стійкий результат без додаткового навантаження на довкілля.

Актуальність дослідження. Актуальність даного дослідження визначається необхідністю забезпечення сталого управління водними ресурсами, підвищення рівня екологічної безпеки та зменшення негативного впливу нафтових забруднень на довкілля.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження, представлене в статті, є складовою актуального наукового напрямку, що стосується охорони водних ресурсів та зменшення техногенного навантаження на навколишнє середовище. У роботі узагальнено, систематизовано й проаналізовано наукові підходи до очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, що дозволяє поглибити теоретичні уявлення про ефективність, переваги та недоліки фізичних, хімічних, біологічних і комбінованих методів водоочищення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Упродовж останніх років спостерігається тенденція до розвитку високоефективних та екологічно безпечних методів видалення нафтопродуктів із водного середовища.

Значну увагу приділено мембранним технологіям, зокрема ультрафільтрації, нанофільтрації та мембранно-біореакторним системам [1]. Сучасні дослідження демонструють, що модифіковані мембрани з використанням наноматеріалів (наприклад, оксидів TiO_2 , CuO , графену) забезпечують високий ступінь очищення (до 95–98 %) за рахунок покращеної гідрофільності, стійкості до забруднення та підвищеної селективності [2,3].

Актуальними є також дослідження у сфері біологічного очищення. Зокрема, впровадження мікроорганізмів, здатних до деградації вуглеводнів, у формі біоплівки або іммобілізованих систем на носіях природного або синтетичного походження дозволяє підвищити ефективність очищення залишкових концентрацій нафтопродуктів. Такі підходи демонструють добрі результати у природних або штучно створених біоценозах (ставках, вологих зонах, біореакторах), особливо в умовах низьких навантажень [4-6].

Фізико-хімічні методи, включаючи коагуляцію, флотацію, сорбцію та електрохімічне окиснення, продовжують залишатися ефективними для середнього рівні забруднення. Окремі дослідження підтверджують перспективність використання комбінованих технологій, зокрема поєднання електрокоагуляції з сорбційними фільтрами на основі активованого вугілля або цеолітів, що дозволяє зменшити концентрацію нафтопродуктів до нормативних значень у короткі терміни [7-9].

Зростає інтерес до застосування природних сорбентів з біостимулюючими властивостями, а також до нанотехнологій – зокрема, наночастинок заліза, які здатні каталізувати окиснення нафтопродуктів у присутності перексиду водню або світлового випромінювання [10]. Однак їх широке впровадження стримується економічними та екологічними обмеженнями, що потребує додаткових досліджень з метою оцінки довгострокової ефективності та безпечності.

Комплексні підходи до очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, у сучасних наукових публікаціях розглядаються як найбільш ефективні [11]. Поєднання механічного вилучення, фізико-хімічної обробки та біологічного доочищення забезпечує найвищий ступінь ефективності за умов адаптації системи до конкретних умов забруднення та типу стічних вод.

Таким чином, аналіз останніх публікацій свідчить про зростаючий науковий інтерес до інтегрованих технологій очищення, орієнтованих на мінімізацію негативного впливу на довкілля, економічну ефективність та стійкість у довгостроковій перспективі.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значної кількості досліджень, присвячених очищенню стічних вод від нафтопродуктів, багато аспектів залишаються недостатньо опрацьованими. Зокрема, актуальними залишаються питання порівняльної оцінки ефективності існуючих методів очищення в різних умовах, їх екологічної безпеки, економічної доцільності, рівня утворення вторинних відходів та можливостей для подальшої інтеграції в системи сталого водокористування. Крім того, існує потреба у формуванні узагальненого підходу до вибору технології очищення залежно від складу забруднень, обсягів стічних вод, типу джерела забруднення та екологічних умов. Метою даної роботи є комплексний аналіз доступних методів очищення, їх класифікації, порівняння та визначення найбільш перспективних і безпечних рішень для застосування у практичній діяльності.

Новизна. Запропоновано узагальнену класифікацію методів очищення відповідно до типу забруднення та умов їх застосування, що дозволяє обґрунтовано підходити до вибору оптимальної технології для конкретних природно-техногенних ситуацій. Розроблено принципову схему очищення

стічних вод, які містять нестабілізовані, слабостабілізовані або сильностабілізовані нафтопродукти.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Результати дослідження мають важливе методологічне значення для формування цілісного підходу до аналізу, оцінювання та впровадження технологій очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами.

Виклад основного матеріалу. Наразі відомо чимало способів очищення довкілля від нафтопродуктів, зокрема: природне самоочищення, механічні методи, хімічні способи, фізико-хімічні технології, електрохімічні методи, біологічні методи очищення. Кожен із наведених методів має свої переваги і недоліки.

Самоочищення природного середовища від нафтопродуктів здійснюється завдяки процесам випаровування, емульгування, диспергування, розчинення та фотоокиснення. Усі ці фізико-хімічні явища супроводжуються біологічним розщепленням нафтопродуктів організмами, що населяють екосистему. Проте цей природний механізм не забезпечує повноцінного очищення води й ґрунту до нормативно допустимих рівнів, оскільки концентрація забруднень зазвичай значно перевищує встановлені гігієнічні норми.

Механічні методи очищення реалізуються за допомогою спеціального обладнання та пристроїв, призначених для збору нафти. Ці методи відзначаються простотою використання, однак мають певні недоліки, зокрема невисоку ефективність та утворення великої кількості нафтовмісних шламів, що потребують подальшої обробки. У зв'язку з цим механічне очищення здебільшого застосовується як первинний, попередній етап у процесі ліквідації нафтового забруднення.

Хімічні методи нейтралізації нафтовмісних рідких і твердих відходів базуються на введенні в забруднене середовище спеціальних хімічних реагентів. Залежно від типу взаємодії між реагентами й забруднювачами можуть протікати реакції осадження, окисно-відновні процеси та реакції заміщення.

Для хімічної іммобілізації нафтопродуктів або утворення комплексів з ними застосовуються неорганічні зв'язувальні матеріали, серед яких найбільш поширені цемент, зола, калієві й натрієві силікати, вапно, а також гелеутворюючі речовини – такі як бентоніт і целюлоза.

У багатьох країнах активно розробляються фізико-хімічні методи ліквідації нафтових забруднень на поверхні водойм – річок та морів. Для цього створюються спеціальні хімічні речовини – абсорбенти, які у вигляді рідини або порошку розпилюються безпосередньо на нафтову плівку. Ці речовини не тільки вбирають нафту, але й вступають з нею у хімічні реакції, що призводить до її розкладу. Проте утворені при цьому продукти можуть бути шкідливими,

а іноді навіть токсичнішими за саму нафту, забруднюючи воду.

Попри це, застосування абсорбентів виправдане в тих випадках, коли необхідно розірвати нафтову плівку, що перешкоджає доступу кисню до води, забруднює берегову лінію та становить загрозу для водоплавних птахів і тварин.

До хімічних засобів боротьби з нафтовими розливами також належать диспергенти – речовини, які знижують поверхневий натяг нафтової плівки та сприяють її розпаду на дрібні краплі. Завдяки цьому покращується газообмін між водою та атмосферою, поліпшується проникнення сонячного світла, а також активізується процес біорозкладу нафти.

До фізико-хімічних способів очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, належать такі процеси, як флотація, флокуляція та сорбція.

Серед методів, що передбачають руйнування (деструкцію) забруднювачів, виділяють біологічні та термічні технології.

Термічні способи утилізації нафтопродуктів включають спалювання та піроліз.

Спалювання є найпоширенішим і технологічно опрацьованим методом. Воно здійснюється в спеціальних печах різних типів при температурах не нижче 1200 °С.

Біологічні методи утилізації промислових і побутових відходів набувають все більшого поширення. Вони базуються на здатності певних штамів мікроорганізмів у процесі своєї життєдіяльності розкласти або поглинути в біомасу різноманітні органічні забруднення.

Біологічні технології найчастіше застосовуються для знешкодження органічних токсичних речовин, сполук важких металів, а також азотовмісних і фосфорних забруднювачів у ґрунтах.

Проте біологічні способи очищення нафтозабруднень застосовують обмежено, оскільки для ефективного біорозкладу нафти за участі штучно вирощених мікроорганізмів потрібні тривалий час та підвищена температура середовища.

Забруднення водних екосистем нафтопродуктами є одним із найсерйозніших проявів впливу людської діяльності на довкілля. потрапляння нафти та її похідних у водойми зазвичай відбувається через аварії на транспорті, прориви нафтопроводів, скидання промислових стічних вод або порушення правил зберігання нафтопродуктів. На поверхні води утворюється нафтовий шар, який ускладнює газообмін між водою та атмосферою, порушує тепловий режим та знижує прозорість, що негативно впливає на фізико-хімічні характеристики водного середовища. Спостерігається зменшення концентрації розчиненого кисню, зміни рН та підвищення вмісту токсичних речовин, зокрема ароматичних вуглеводнів – бензолу, толуолу, ксилолу, що мають канцерогенну дію.

Окрім прямої токсичної дії, нафтопродукти змінюють властивості середовища – знижують прозо-

рість води, сприяють евтрофікації. Хоча деякі мікроорганізми можуть розкласти нафтові сполуки, цей процес відбувається повільно і супроводжується значним споживанням кисню, що ще більше погіршує стан водойми. У довгостроковій перспективі нафтове забруднення спричиняє деградацію екосистем, зменшує їхню стійкість до інших впливів і порушує екологічну рівновагу, особливо в замкнених або слабо проточних водоймах, де природне самоочищення дуже повільне.

Ефективність очищення води від нафтопродуктів залежить від характеру та рівня забруднення, а також фізико-хімічних властивостей самих речовин. Застосовують різні методи очищення – механічні, фізико-хімічні й біологічні, які комбінуються відповідно до стадії забруднення.

Висновки. Аналіз методів очищення стічних вод, забруднених нафтопродуктами, свідчить про те, що це складна екологічна проблема, яка потребує комплексного та диференційованого підходу. Потрапляння нафти та її похідних у водне середовище призводить до серйозних змін фізико-хімічних властивостей води та завдає значної шкоди водним організмам. Найефективнішим є поетапне очищення, що включає механічні, фізико-хімічні та біологічні методи, кожен з яких виконує важливу функцію на певному етапі забруднення. Механічні способи доцільно застосовувати для видалення великої кількості нафти з поверхні води, фізико-хімічні методи дозволяють усунути емульговані та розчинені фракції, а біологічні – забезпечують остаточне очищення до екологічно безпечного рівня. Такий інтегрований

підхід дає змогу досягти високої ефективності очищення, знижує екологічні ризики та сприяє відновленню водних екосистем.

Нафтовмісні стоки практично завжди одночасно з нафтопродуктами містять також механічні частинки, поверхнево-активні речовини, органічні сполуки і, у багатьох випадках, важкі метали. При розробці технологічних схем очищення, окрім багатоконпонентності цих стічних вод, необхідно неодмінно враховувати стан і ступінь агрегативної стійкості нафтопродуктів, що містяться в стічних водах (рис. 1).

Найбільш складною проблемою є очищення стічних вод, що містять сильно стабілізовані нафтопродукти. У технології очищення таких стоків, як правило, застосовується ступінь дестабілізації (демульгування), яка дозволяє ґрунтовно понизити агрегативну стійкість емульсій і дає можливість здійснення ефективної коагуляції частинок нафтопродуктів, що дестабілізуються.

На рис. 2 приведені можливі варіанти принципів схем очищення нафтовмісних вод, що містять нестабілізовані, слабостабілізовані і сильно стабілізовані нафтопродукти. Ці технологічні схеми в тому або іншому варіанті реалізовані на практиці і підтвердили свою високу ефективність і надійність.

Комплексний підхід до очищення стічних вод є важливим кроком у збереженні водних ресурсів та забезпеченні екологічної безпеки на всіх етапах промислового виробництва, що впливає на навколишнє середовище.

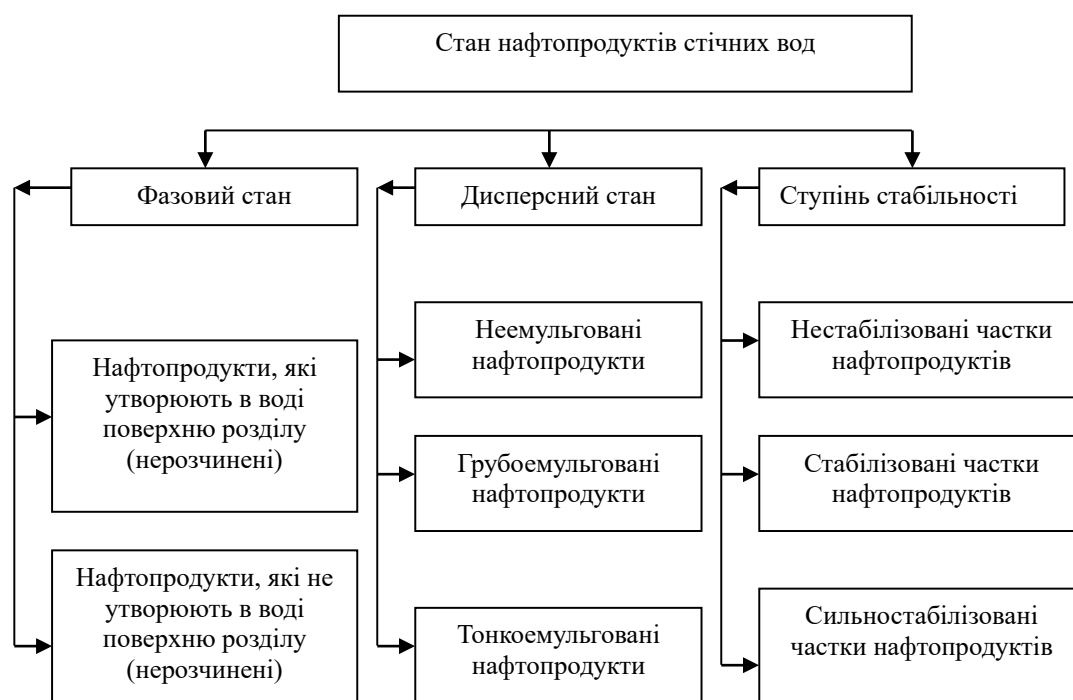


Рис. 1. Характеристика стану нафтопродуктів в стічних водах

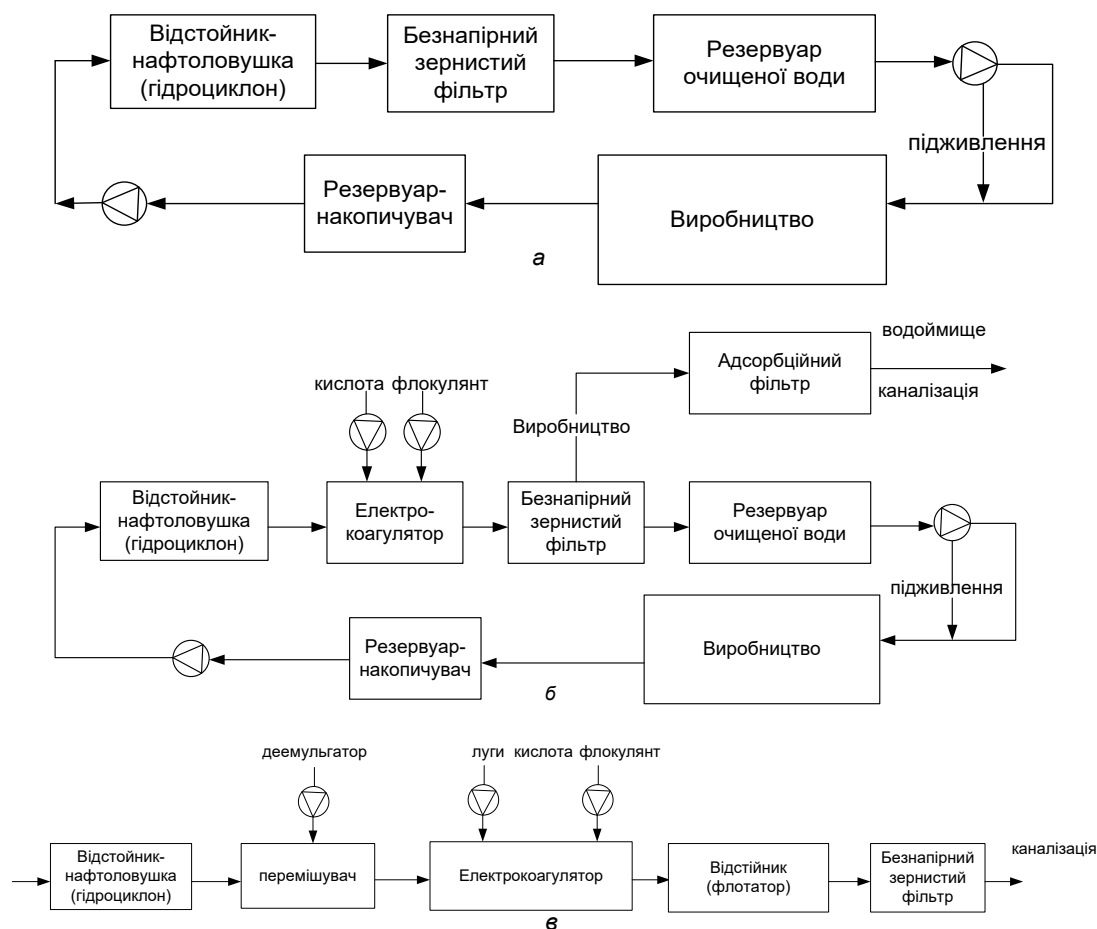


Рис. 2. Принципові схеми очищення стічних вод, які містять нестабілізовані (а), слабостабілізовані (б) або сильностабілізовані (в) нафтопродукти

Література

1. Вознюк М.Б., Т.О. Шаблій Ефективність очищення води від нафти алюмінієвими коагулянтами. *Вісник НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2023. № 1(22). С. 37–51.
2. Vozniuk M., Shabliy T. Evaluation of the effectiveness of treatment water emulsions from oil by physico-chemical methods. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2023. № 4. С. 65–72.
3. Alternative Ways of Extracting Oil from Water Bodies / T. Shabliy et al. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. № 24(11). P. 127–134.
4. Materials and Technologies for the Tertiary Treatment of Produced Water Contaminated by Oil Impurities through Nonfibrous Deep-Bed Media: A Review / P. Sobolciak et al. *Water*. 2020. № 12. P. 3419.
5. Bhushan B. Bioinspired oil-water separation approaches for oil spill clean-up and water purification. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2019. Vol. 377(2150). P. 20190120.
6. Oily Wastewater Treatment: Overview of Conventional and Modern Methods, Challenges, and Future Opportunities / K. Abuhasel et al. *Water*. 2021. Vol. 13 (7). P. 980
7. Separation of emulsified crude oil from produced water by gas flotation: A review / Ce Wang et al. *The Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 845. P. 157304.
8. A two-stage dissolved air flotation saturator configuration for significant microbubble improvement / M.H. Nikfar et al. *Environ Technol*. 2023. Vol. 44(9). P. 1228–1237.
9. The use of flotation method for purification of wastewaters contaminated with oil products / M. Maksymiuk et al. *Water&Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*. 2021. Vol. 29(№ 1). P. 11–19.
10. Clay-Coated Meshes with Superhydrophilicity and Underwater Superoleophobicity for Highly Efficient Oil.Water Separation / Shaolin Y. et al. *Materials (Basel)*. 2023. 16(12). 4396.
11. Preparation of superhydrophobic mesh and application in multi- stage parallel oil. Water separation system / X. Chen et al. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2020. Vol. 41 (1). P. 39-46

Дата першого надходження рукопису до видання: 25.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЗМІНИ СТРУКТУРНИХ ПОКАЗНИКІВ ФІТОПЛАНКТОНУ Р. ДНІПРО В РАЙОНІ М. ХЕРСОН ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ ГРЕБЛІ КАХОВСЬКОЇ ГЕС¹

Середа Т.М., Мантурова О.В., Афанасьєв С.О.

Інститут гідробіології Національної академії наук України
пр. Володимира Івасюка, 12, 04210, Київ
seredatm@ukr.net, omanturova@ukr.net, safanasyev@ukr.net

Серед комплексу чинників, що зумовлювали формування угруповань гідробіонтів та якість води Нижнього Дніпра, провідна роль належала Каховському водосховищу. Головним чинником функціонування річкової екосистеми в останні десятиліття був режим добових і тижневих попусків Каховської ГЕС, що зумовлював короткотермінові коливання води в руслі та інтенсивність водообміну з водоймами гирлової ділянки Дніпра. Структура дніпровського фітопланктону в районі м. Херсон за ретроспективними даними останнього десятиліття відзначалася широкою амплітудою коливань кількісних показників, що підтверджує нестабільний режим в руслі Дніпра до руйнування греблі.

Порівняльний аналіз структури літнього фітопланктону до руйнування греблі Каховської ГЕС (2018–2021 рр.) та після витоку Каховського водосховища через русло Дніпра в районі м. Херсон (2023 р.) встановив зміни у формуванні планктонних угруповань. Так, фітопланктон влітку 2018–2021 рр. характеризувався багатим видовим складом, переважно діатомових, зелених і ціанобактерій, але низькими показниками їх кількісного розвитку, чисельність угруповань була нижчою майже в 3 рази, біомаса – в 9–20 разів. Характерною ознакою фітопланктону Дніпра в умовах впливу режиму ГЕС було встановлено полідомінантний, але неусталений характер формування біомаси угруповань з переважанням у 2018 р. ціанобактерій і динофітових водоростей літнього епілімніону, у 2019 р. – діатомових лотичних умов, у 2021 р. – евгленових водоростей і зелених вольвоксових водоростей.

Після руйнування дамби фітопланктон продемонстрував певну стабільність якісних і кількісних показників влітку 2023 р. Загальною рисою літнього фітопланктону варто відзначити домінування діатомових і зелених водоростей, що розвиваються в умовах евтрофного епілімніону, за участі ціанобактерій, динофітових і евгленових водоростей. Періодична поява евгленових і зелених вольвоксових водоростей у домінуючому комплексі фітопланктону свідчить про надходження до русла легко доступних органічних речовин з площі водозбору та із залишкових водойм колишнього Каховського водосховища в результаті паводків. *Ключові слова:* фітопланктон, чисельність, біомаса, домінуючі комплекси, функціональні групи водоростей, Дніпро в районі м. Херсон, руйнування Каховської греблі.

Changes in structural indicators of dnieper phytoplankton nearby the kherson city after the demolition of the kakhovskia hydropower plant DAM. Sereda T., Manturova O., Afanasyev S.

Among a set of factors that conditioned forming of the hydrobionts' communities and water quality of the Lower Dnieper section, the crucial role was played by the Kakhovka reservoir. The main factor of the riverine ecosystem functioning over the last decades consisted in regime of the daily and weekly discharges of the Kakhovka hydropower plant (HPP), that conditioned the short-term fluctuations of water level in the riverbed and intensity of the water exchange with the water bodies of the mouth area. According to the literature data, over the last decade the structure of the Dnieper phytoplankton nearby the Kherson city was characterized by wide amplitude of the quantitative parameters' fluctuation, that confirmed to the unstable hydrological regime in the Dnieper riverbed downstream Kakhovka NPP before the dam demolition.

Comparative analysis of the summer phytoplankton nearby the Kherson city before the Kakhovka dam demolition (2018–2021) and after emptying of the Kakhovka reservoir through the Dniper (2023) revealed changes in the planktonic communities forming. Thus, in summer 2018–2021 phytoplankton was rich in species, comprised mainly Bacillariophyta, Chlorophyta and Cyanobacteria, at this, quantitative parameters were low; phytoplankton numbers were almost three times lower, biomass 9–20 times lower. The peculiar feature of the Dnieper phytoplankton under the influence of the Kakhovka HPP operation consisted in polydominant however unstable character of the communities' biomass forming. Thus, in 2018 prevailed Cyanobacteria and Miozoa of the summer epilimnion, in 2019 – diatoms of the lotic habitats, in 2021 – Euglenozoa and Volvocales.

After the dam demolition, phytoplankton in summer 2023 demonstrated the certain stability of the quantitative and qualitative parameters. The main feature consisted in prevailing of Bacillariophyta and Chlorophyta developing in conditions of the eutrophic epilimnion, with participation of Cyanobacteria, Miozoa and Euglenozoa. Periodic occurrence of Euglenozoa and Volvocales in the dominant complex indicated income of the easily accessible organic matters washed off the catching area and residual water bodies of the former Kakhovka reservoir over the floods. *Key words:* phytoplankton, cell count, biomass, dominant species complex, functional groups of algae, Dnieper nearby the Kherson city, Kakhovka dam demolition.

¹ Робота виконана за бюджетною програмою КПКВК 6541230 «Підтримка пріоритетних для держави наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок»

Постановка проблеми. Гирлова ділянка Дніпра розташована на Причорноморській низовині і являє собою розвинену дельту, представлену системою островів, розділених протоками і рукавами, які сполучаються з Дніпровсько-Бузьким лиманом. Ширина річкової долини – 4–6 км, правий берег – високий, лівий – пологий, низинний, глибини в межах 5–7 м, швидкість течії – 0,6–0,7 м/с. В заплаві Нижнього Дніпра розташовані Херсонські плавні, які є унікальним природним фільтром для дніпровської води.

Серед комплексу чинників, що зумовлювали формування гідробіотів та якості води Нижнього Дніпра, провідна роль належала Каховському водосховищу [1, 2]. Головним чинником функціонування річкової екосистеми в останні десятиліття був режим добових і тижневих попусків Каховської ГЕС, що зумовлював короткотермінові коливання води в руслі. В основному руслі і придатковій системі протягом доби відмічалися одно- і двопікові прямі довгі хвилі, фазова швидкість яких досягала 7–8 м/с, з поступальним переміщенням водних мас від греблі ГЕС до гирла зі швидкістю 2–6 м/с, завдяки яким відбувався водообмін руслової мережі із заплавами водоймами. Період зовнішнього водообміну водойм гирлової ділянки Дніпра становив від двох до кількох десятків діб, що і визначало суттєві відмінності екологічного стану як в руслі, так і в водних об'єктах річкової екосистеми [3].

У перші дні після підризу греблі (6 червня 2023 р.) на тлі аномального пришвидшення і турбулізації течії Дніпра, зриву донних наносів, стрімкого підвищення каламутності, затоплення територій, спостерігався винос з Каховського водосховища величезної кількості планктону. Так, за розрахунками в перший тиждень після підризу греблі виносилось від 6 до 17 тис. т мікродоростей на добу [4]. Вплив на біорізноманіття і стан водних та прибережних екосистем вище греблі був менш стрімким, але значно більш тривалим та масштабним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За ретроспективними даними останнього десятиліття структура дніпровського фітопланктону в районі м. Херсон до руйнування греблі відзначалася широкою амплітудою коливань кількісних показників, що підтверджує нестабільний режим в руслі Дніпра.

Так, дослідження Г.М. Мінаєвої [1] в період 2016–2020 рр. свідчать, що якісну структуру фітопланктону формували зелені, діатомові і ціанобактерії, частка яких у загальному флористичному спектрі складала відповідно 37, 29 і 18 %, частка евгленових – 6 %. Показники кількісного розвитку фітопланктону були на рівні 2,3–2,7 млн. кл/дм³ і 0,49–0,84 мг/дм³. Серед ціанобактерій, які домінували за чисельністю, переважали представники родів *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Merismopedia*, *Anabaenopsis*. Навесні основу біомаси формували діатомей родів *Melosira*, *Stephanodiscus*, *Aulacoseira*, влітку – зелені водорості роду *Chlamydomonas*, динофітові роду

Peridinium, діатомові роду *Aulacoseira*, восени – діатомові родів *Melosira*, *Stephanodiscus*, *Aulacoseira*, *Synedra*, зелені родів *Desmodesmus*, *Chlamydomonas*, динофітові роду *Peridinium*, іноді у супроводі ціанобактерій і евгленових.

За даними В.І. Щербака зі співавторами [2] у фітопланктоні р. Дніпро в межах м. Херсон влітку 2018 р. відмічена інтенсивна вегетація ціанобактерій, зелених і діатомових, частка чисельності яких відповідно складала 62–65, 18–32 і 1–12 %, частка біомаси – 4–18, 48–50 і 6–35 %. Загальні показники кількісного розвитку досягали 64,2–119,9 млн. кл/дм³ і 17,7–21,8 мг/дм³. Домінували ціанобактерії родів *Microcystis*, *Oscillatoria*, *Gloeocapsa*, зелені – *Coelastrum*, *Coenochloris*, *Pediastrum*, *Chlamydomonas*, діатомові – *Stephanodiscus*, *Aulacoseira*, динофітові – *Peridinium*.

За мету цієї роботи поставлено проаналізувати формування структурних показників літнього фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон до та після руйнування дамби Каховської ГЕС.

Актуальність і новизна досліджень зумовлені практично відсутністю робіт, присвячених вивченню зміни режиму вищерозташованої ділянки від лентичного до лотичного як основного чинника впливу на формування структури угруповань гідробіотів при відновленні річкового стоку.

Матеріал і методи досліджень. Матеріалом досліджень і аналізу роботи є структурні показники фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон до руйнування греблі Каховської ГЕС (липень–серпень 2018–2021 рр.) і після витоку Каховського водосховища через русло річки (червень–серпень 2023 р.).

Відбір, консервування та обробка фітопланктонних проб здійснювались згідно загальноприйнятим в гідробіології та альгології методикам [5]. Проби відбирали батометром Рутнера об'ємом 1 л з глибини 0,3–0,5 м. Після відстоювання проби концентрували методом седиментації. Камеральне опрацювання проб проводили в камері Нажотта об'ємом 0,02 см³ за допомогою світлового мікроскопу Carl Zeiss (окуляр 10^x, об'єктив 40). Чисельність водоростей визначали методом прямого підрахунку, біомасу – стереометричним методом. Для визначення таксономічного складу водоростей використовували сучасні вітчизняні та закордонні визначники. Домінуючими вважали види та внутрішньовидові таксони водоростей, частка яких переважає 10% загальних показників видового складу, чисельності або біомаси, субдомінантами – 5–10% кількісного різноманіття угруповань.

З метою аналізу змін та розкриття механізмів формування структури фітопланктону застосовано метод функціональної класифікації водоростей. Функціональні групи (кодони) і фактор F, згруповані за функціональною, біотопічною, морфологічною та екологічною різноманітністю водоростей визначали за таблицями і формулами [6].

Результати досліджень. Наші оригінальні дані досліджень фітопланктону річки в районі м. Херсон влітку протягом 2018–2021 рр. продемонстрували багатий видовий склад та низькі показники розвитку угруповань. Видове багатство змінювалося в межах 31–42 внутрішньовидових таксонів (ввт) водоростей, представлене переважно діатомово-зеленим комплексом з домінуванням діатомових на рівні 28–29 %, зелених – 38–62 %, серед яких максимальна частка припадала на 2019 р. Частка ціанобактерій коливалася в межах 7–19 %, максимальні значення зареєстровані у 2018 р.

Чисельність літнього фітопланктону у 2018 р. була найвищою за період досліджень і досягала 6500 тис. кл/дм³ переважно за рахунок інтенсивного розвитку ціанобактерій на рівні 82 %, у 2019 р. чисельність становила 3296 тис. кл/дм³ за домінування зелених і діатомових водоростей відповідно на рівні 47 і 35 %, у 2021 р. – 3176 тис. кл/дм³ за рахунок вегетації ціанобактерій на рівні 54 % у супроводі зелених 27 % і діатомових 11 % (рис. 1). За чисельністю в період досліджень домінували ціанобактерії роду *Microcystis*, у 2018 р. у супроводі роду *Aphanizomenon*.

Біомаса протягом 2018–2021 рр. характеризувалася більш стабільними кількісними показниками 0,85–0,92 мг/дм³, але відрізнялася домінуючими комплексами: у 2018 р. домінували діатомові, динофітові і ціанобактерії відповідно на рівні 37, 29 і 17 %, у 2019 р. – діатомові і зелені відповідно 62 і 35 %, у 2021 р. – діатомові, евгленові і зелені відповідно 35, 34 і 24 % (рис. 2). За показниками біомаси фітопланктону розвивалися полідомінантні комплекси: з переважанням у 2018 р. ціанобактерій роду *Microcystis* і динофітових водоростей роду *Ceratium*, у 2019 р. – діатомових

Synedra і *Nitzschia*, у 2021 р. – евгленових роду *Trachelomonas*.

Моніторингові дослідження фітопланктону в районі м. Херсон після підризу греблі Каховської ГЕС охоплюють період літньої межени 2023 р. і свідчать про динамічний характер формування як у видовому відношенні, так і за показниками кількісного розвитку.

Видове багатство таксонів у фітопланктонних пробах влітку 2023 р. змінювалося в межах 20–36 ввт. Частка систематичних груп коливалася в широкому діапазоні: відсоток діатомових водоростей у перші тижні червня зберігався в межах 50–57 %, з липня до початку серпня – знижувався до 22–36 % за рахунок вегетації евгленових водоростей до 28–32 %, в кінці серпня переважали діатомові, ціанобактерії і зелені водорості відповідно на рівні 29, 25 і 21 %.

Кількісні показники фітопланктону влітку 2023 р. характеризувалися широкою амплітудою коливань. Чисельність коливалася в межах 11020–21440 кл/дм³ з мінімальними 17 липня і максимальними 20 червня. Характер формування чисельності фітопланктону виражався домінуванням ціано-діатомового комплексу, всередині якого акцент домінування змінювався за коливання частки ціанобактерій в межах 43–80 %, діатомових – 4–42 %, у серпні посилювалась роль зелених, частка яких досягала 20–27 %, знижуючи частку ціанобактерій (див. рис. 1). Серед ціанобактерій з червня до серпня розвивалися види роду *Microcystis*, у кінці серпня до них долучалися представники родів *Anabaena*, *Aphanizomenon* і *Oscillatoria*, серед діатомових водоростей в період досліджень переважали представники центричних водоростей роду *Aulacoseira*. Варто відмітити роль у формуванні чисельності фітопланктону зелених водоростей роду *Dictyosphaerium*, які вийшли на

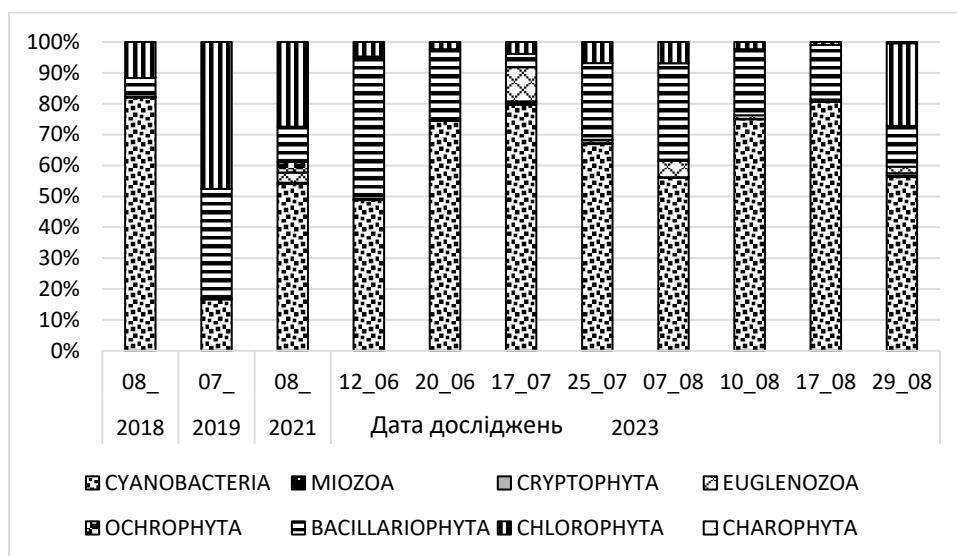


Рис. 1. Чисельність фітопланктону за часткою систематичних груп р. Дніпро в районі м. Херсон в часовому аспекті

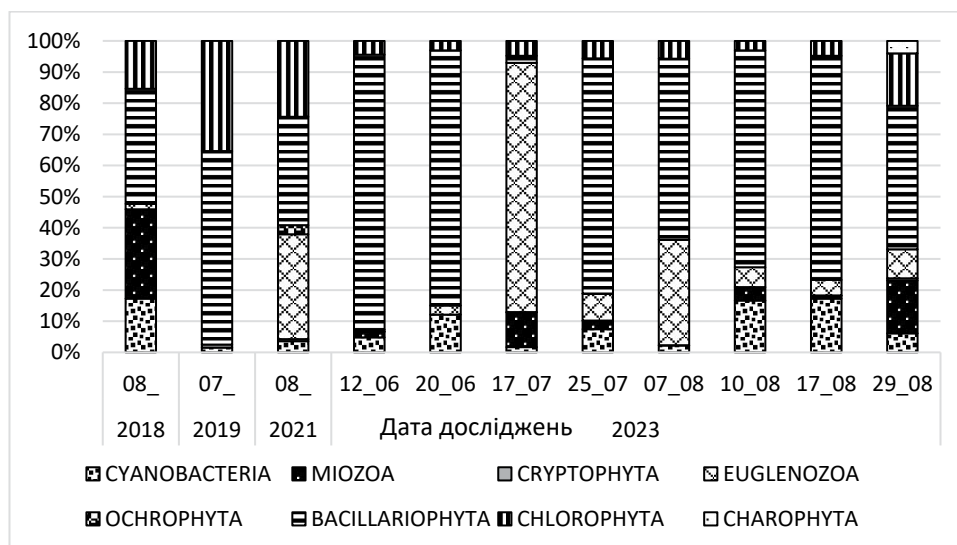


Рис. 2. Біомаса фітопланктону за часткою систематичних груп р. Дніпро в районі м. Херсон в часовому аспекті

домінуючі позиції, знизивши частку ціанобактерій, наприкінці серпня.

Біомаса фітопланктону в літню межень 2023 р. змінювалася в межах 6,80–19,38 мг/дм³ з мінімальними 29 серпня і максимальними 7 серпня. Основу біомаси фітопланктону (див. рис. 2) формували переважно діатомові водорості на рівні 32–95 % з домінуванням представників роду *Aulacoseira*, періоди зниження домінування діатомових супроводжувалися у серпні розвитком ціанобактерій і динофітових водоростей на рівні 17 %. Із загальної тенденції випадали проби, відібрані 17 липня 2023 р., завдяки масовому розвитку евгленових водоростей із родів *Euglena*, *Trachelomonas*, *Strombomonas*, *Lepocinclis* з часткою біомаси до 80 %. Масова вегетація евгленових, очевидно, зумовлена надходженням до русла легко доступних органічних речовин.

Завдяки застосуванню методу функціональної класифікації водоростей [6], який широко використовується в країнах ЄС і апробований нами при дослідженні Верхнього Дністра [7], Дунаю [8], Горині [9], ми проаналізували зміни структури планктонних угруповань річки в районі м. Херсон і розкрили механізми їх перебудови після руйнування греблі Каховського водосховища.

За період досліджень літнього фітопланктону 2018–2021 рр. і 2023 р. загалом виділено 18 функціональних груп за біотопічною, функціональною, морфологічною та екологічною приналежністю водоростей з F-фактором від 1 до 5. За переважанням частки в загальній біомасі фітопланктону було виділено 8 провідних груп водоростей (таблиця 1), решта функціональних груп, біомаса яких була незначною, а присутність епізодичною, віднесена до «Інші».

Аналіз показав, що в умовах впливу режиму попусків Каховської ГЕС провідні функціональні

групи літнього фітопланктону р. Дніпро були різними (рис. 3). Так, у серпні 2018 р. переважали ціанобактерії і динофітові водорості групи L_M (до 39 %), бентосні і епіфітні діатомові водорості групи T_D (17 %) і діатомей, приурочені до лотичних умов групи T_B (16 %). У липні 2019 р. найбільшу частку біомаси фітопланктону формували реофільні діатомові водорості групи T_B (біля 36 %), діатомові і зелені водорості групи P (16 %), що розвиваються в умовах евтрофного епілімніону, і діатомові мілководних скаламучених біотопів групи D (14 %), серед «інших» переважали зелені водорості родів *Actinastrum*, *Desmodesmus*, приурочені до мілководних евтрофних зон, віднесені до групи J (до 18 %). У серпні 2021 р. домінували представники групи W1 (до 30 %) – евгленові і зелені вольвоксові водорості застійних зон з вмістом органічних речовин, діатомові водорості групи D (18 %), діатомові і зелені водорості групи P (11 %), а також динофітові і евгленові водорості мілководних мезотрофних, добре перемішуваних біотопів групи W2 (11 %).

Після руйнування греблі провідною функціональною групою дніпровського фітопланктону в літню межень 2023 р. була група P – діатомові і зелені водорості, що розвиваються в умовах евтрофного епілімніону, частка яких коливалася в межах 68–80 %, знижуючись в кінці серпня до 36 %, завдяки співдомінуванню ціанобактерії групи L_M (на рівні 16 %), наприкінці серпня – динофітових і евгленових водоростей групи W2 (біля 22 %) і діатомей мілководних скаламучених біотопів групи D (до 18 %).

Винятком у формуванні літнього фітопланктону р. Дніпро після руйнування греблі був нетривалий період, який охоплював 4–6 тижнів, коли потік водних мас інтенсивно переміщався руслом, підтоплюючи заплаву. Завдяки потраплянню в русло

Таблиця 1

Провідні функціональні групи згідно [6] у біомасі літнього фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон

Кодон	F-фактор	Представники і біотопічна приуроченість
T _B	F=5	Діатомеї, приурочені до лотичних умов (<i>Surirella</i> , <i>Nitzschia</i> , <i>Navicula</i> , <i>Gomphonema</i> , <i>Fragilaria</i> , <i>Achnanthes</i>)
D	F=4	Діатомеї, приурочені до мілководних скаламучених біотопів (<i>Cyclotella</i> , <i>Stephanodiscus</i> , <i>Synedra</i>)
T _D	F=3	Бентосні та епіфітні діатомеї, нитчасті зелені водорості у водотоках з повільною течією і наявністю макрофітів (<i>Cocconeis</i> , <i>Caloneis</i> , <i>Stauroneis</i> , <i>Cymatopleura</i> , <i>Amphora</i> , <i>Rhoicosphaenia</i> , <i>Cymbella</i>)
P	F=3	Діатомові і зелені водорості, що розвиваються в умовах евтрофного епілімніону (<i>Melosira</i> , <i>Aulacoseira</i> , <i>Dictyosphaerium</i> , <i>Coelastrum</i>)
W2	F=3	Водорості (переважно джгутикові) мілководних мезотрофних, добре перемішуваних лімнофільних біотопів (<i>Peridinium</i> , <i>Gymnodinium</i> , <i>Trachelomonas</i> ,)
Y _{pH}	F=2	Водорості збагачених Са лужних біотопів (<i>Phacotus</i> , <i>Pteromonas</i>)
W1	F=1	Водорості застійних зон з вмістом органічних речовин (<i>Euglena</i> , <i>Phacus</i> , <i>Lepocinclis</i> , <i>Pandorina morum</i>)
L _M	F=1	Види літнього епілімніону в евтрофних умовах (<i>Microcystis</i> , <i>Ceratium</i>)

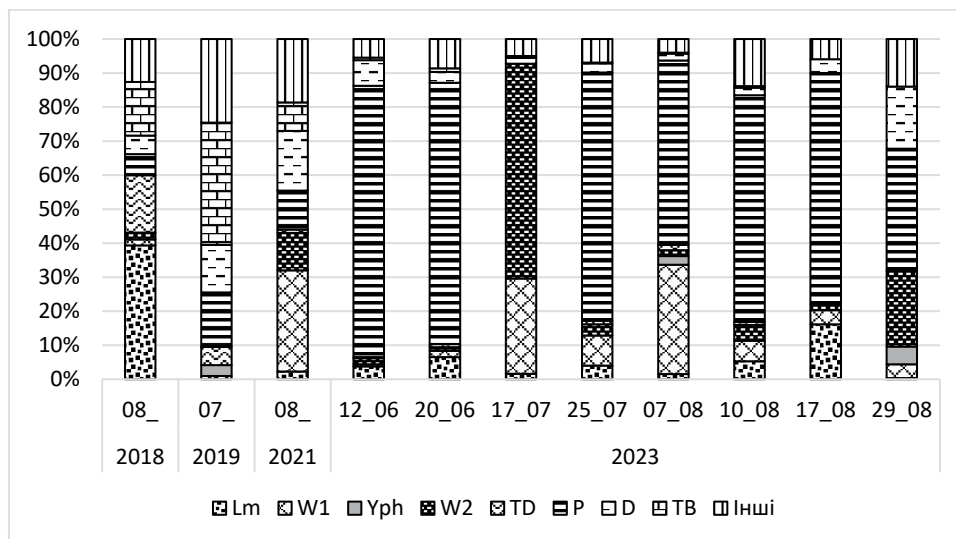


Рис. 3. Частка біомаси функціональних груп літнього фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон

значних об'ємів органічної речовини у фітопланктоні 17 липня переважали представники евгленових водоростей, віднесені до функціональних груп W1 і W2, біомаса яких досягала відповідно 28 і 63 %, 7 серпня зареєстровано спалах евгленових водоростей групи W1 до 32 %.

Варто зазначити, що у порівнянні з періодом до руйнування греблі влітку 2023 р. знизилась роль діатомових водоростей групи T_B, приурочених до лотичних умов, відповідно від 16–36 % до 1 % або взагалі були відсутні.

Висновки. Аналіз структури фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон в часовому аспекті показав, що до руйнування греблі Каховської ГЕС

фітопланктон характеризувався низькими показниками кількісного розвитку, формування яких відбувалося в умовах добових і тижневих попусків ГЕС, що зумовлювали періодичні коливання рівня води в руслі. Характерною ознакою фітопланктону Дніпра в умовах впливу режиму ГЕС було встановлено неусталений характер формування біомаси угруповань з переважанням у 2018 р. ціанобактерій і дінофітових водоростей літнього епілімніону групи L_M, у 2019 р. – діатомових лотичних умов групи T_B, у 2021 р. – евгленових водоростей і зелених вольвоксових водоростей групи W1.

Після руйнування дамби фітопланктон продемонстрував динамічний характер формування якіс-

них і кількісних показників протягом літньої межени 2023 р. з певними ознаками стабільності у серпні. Загальною рисою літнього фітопланктону варто відзначити домінування діатомових і зелених водорості функціональної групи Р, що розвиваються в умовах евтрофного епілімніону, за участі ціанобактерій, динофітових і евгленових водоростей. Періодична поява евгленових і зелених вольвоксових водоростей груп W1 і W2 у домінуючому комплексі фітопланктону свідчить про надходження до русла легко доступних органічних речовин з площі водозбору

та із залишкових водойм колишнього Каховського водосховища в результаті паводків.

Наразі можна констатувати відновлення структури типового річкового фітопланктону, про що свідчать показники якісного складу та кількісного розвитку фітопланктону влітку 2023 р. за домінування ціанобактерій, діатомових і зелених водоростей, як і до спорудження дамби в 50-і роки минулого століття. Разом з тим, дослідження фітопланктону продемонстрували, що ділянка річки стала більш вразливою, довготривалий гомеостаз якої порушено.

Література

1. Мінаєва Г.М. Структурно-функціональні характеристики фітопланктону водотоків Нижнього Дніпра. *Природничий альманах*, 2021. Вип. 30. С. 75–83.
2. Щербак В.І., Шерман І.М., Кутіщев П.С. та ін. Сучасний екологічний стан і біорізноманіття Дніпровсько-Бузької естуарної системи у зв'язку з промисловою іхтіофауною. Херсон: ФОП Вишемирський В.С., 2020. 200 с.
3. Timchenko V. M., Korzhov Ye. I., Guliayeva O. A., Batog S. V. Dynamics of Environmentally Significant Elements of Hydrological Regime of the Lower Dnieper Section. *Hydrobiological Journ.*, 2015. Vol. 51(6). P. 75–83.
4. Середа Т.М., Афанасьєв С.О. Перебудова структури фітопланктону р. Дніпро в районі м. Херсон після руйнування дамби Каховської ГЕС. *Перспективи гідроекологічних досліджень в контексті локальних та глобальних наслідків ведення воєнних дій*: Збірник матеріалів IX з'їзду Гідроекологічного товариства України. Дніпро, 2024. С. 161–164.
5. Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / за ред. В.Д. Романенка. К.: Логос, 2006. 408 с.
6. Borics G., Várбірó G., Grigorszky I. et al. A new evaluation technique of potamoplankton for the assessment of the ecological status of rivers // *Arch. Hydrobiol. Suppl.*, 2007. Vol. 161 (3–4), P. 465–486.
7. Управління транскордонним басейном Дністра: встановлення референційних показників для оцінки екологічного стану масивів поверхневих вод / за ред. С. О. Афанасьєва, О. В. Мантурової. К.: Кафедра, 2019. – 394 с.
8. Liashenko A. V., Zorina-Sakharova K. Y., Pohorielova M. S., Sereda T. M., Abramuk I.I., Trylis V. V. Impact of hydrotechnical construction on aquatic ecosystems of the Kiliia branch of the Danube Delta. *Biosyst. Divers.*, 2022. Vol. 30(4). P. 359–371.
9. Sereda T. M., Manturova O. V., Usov O. Ye. Patterns of Phytoplankton and Microphytobenthos Development in Channel Ecotones in the Goryn River. *Hydrobiological Journ.*, 2024. Vol. 60(1). P. 28–42.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ОЦІНКА АЛЬГОІНДИКАЦІЙНИМ МЕТОДОМ ВПЛИВУ БІОГЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ В РІЧЦІ ВОРСКЛА

Степова О.В., Тягній Л.М.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

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

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

Постановка проблеми. Останнім часом в різних технологічних процесах вода від заводів, й виробничих підприємств, забруднюється різними органічними, неорганічними речовинами, і таким чином утворюються стічні води. Надходження у водойми величезної кількості забруднюючих речовин призводить до деградації як окремих компонентів екосистеми, так і цілих груп водойм [1- 4, 11].

Актуальність дослідження. Більшість міських очисних споруд біологічного очищення стічних вод в Україні працюють вкрай неефективно, внаслідок чого є причиною забруднення природних водойм, процесів розвитку біоценозу, пригніченням розвитку водних організмів. Найбільш ефективним способом очистки стічних вод є біологічна очистка в біоплато з використанням макрофітів, гідрофітів, гігрофітів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Для аналізу негативних змін в водних об'єктах від впливу біогенних речовин пропонується дослідження з використанням методу альгоіндикації [1, 2, 11].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна та наукова література з альгології складає різні системи класифікацій рослин. Існує ряд питань у фахівців з вибору потрібної водорості та є предметом дискусій ботаніків, генетиків, гідробіологів, мікробіологів. В дидактичних матеріалах послідовно описано термінологічний словник з ілюстраціями, схеми життєвих циклів ключових представників водоростей, а також представлена порівняльна характеристика найбільш актуальних систематик [1- 8].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. В даний час в Україні немає єдиної узагальненої системи про визначенню конкретних видів водоростей в альгології для проведення оцінки впливу біогенних елементів на водний об'єкт. В результаті наукові літературні джерела [1- 4], такі як довідники та монографії, підручники в яких на високому науковому та методологічному рівні дана характеристика конкретних видів, що використовуються в дослідженнях з оцінки альгоіндикаційним методом.

Новизна. Вперше досліджено акумуляційну здатність вищих водних рослин річки Ворскли в межах м. Полтави та проведена порівняльна характеристика рогузу вузьколистого, очерету звичайного, сусаку зонтичного, рдесту пронизливого за здатністю поглинати із поверхневих вод та акумулювати N, P, K та інших елементів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Дослідження проводились за методом альгоіндикації, який засновано на дослідженні впливу біогенних елементів на різні зміни в характеристиці річки Ворскли в межах м. Полтави [5 – 10].
Ключові слова: альгоіндикація, стічні води, вища водна рослинність, акумуляція.

Assessment of the impact of biogenic elements in the Vorskla River using the algoindication method. Stepova O., Tiahnii L.

Problem statement. Recently, in various technological processes, water from factories and production enterprises has been contaminated with various organic and inorganic substances, and thus wastewater is formed. The influx of a huge amount of pollutants into water bodies leads to the degradation of both individual components of the ecosystem and entire groups of water bodies [1-4, 11].

Relevance of the study. Most urban biological wastewater treatment plants in Ukraine operate extremely inefficiently, resulting in pollution of natural water bodies, biocenosis development processes, and inhibition of the development of aquatic organisms. The most effective method of wastewater treatment is biological treatment in a bioplateau using macrophytes, hydrophytes, and hygrophytes.

The connection of the author's work with important scientific and practical tasks. To analyze negative changes in water bodies from the impact of biogenic substances, a study using the algoindication method is proposed [1, 2, 11].

Analysis of recent research and publications. Modern and scientific literature on algology consists of various plant classification systems. There are a number of questions among specialists on choosing the right algae and are the subject of discussions among botanists, geneticists, hydrobiologists, and microbiologists. The didactic materials consistently describe a terminology dictionary with illustrations, life cycle diagrams of key representatives of algae, and also present a comparative characteristic of the most relevant taxonomies [1- 8].

Highlighting previously unresolved parts of the general problem, to which the specified article is devoted. Currently, Ukraine does not have a single generalized system for determining specific types of algae in algology for assessing the impact of biogenic elements on a water body. As a result, scientific literary sources [1- 4], such as reference books and monographs, textbooks in which at a high scientific and methodological level the characteristics of specific species used in studies on the assessment of the algoindication method are given.

Novelty. For the first time, the accumulation ability of higher aquatic plants of the Vorskla River within the city of Poltava was investigated and a comparative characteristic of narrow-leaved cattail, common reed, umbrella sedge, and sharp-edged sedge was carried out in terms of their ability to absorb from surface waters and accumulate N, P, K and other elements.

Methodological or general scientific significance. The studies were conducted using the algoindication method, which is based on the study of the influence of biogenic elements on various changes in the characteristics of the Vorskla River within the city of Poltava [5 – 10]. *Key words:* algoindication, wastewater, higher aquatic vegetation, accumulation.

Викладення основного матеріалу. У річці Ворскла кожен компонент гідробіоценозу виконує певну функцію очищення води [8, 9]. Водорість – це філогенетически гетерогенна група фотоафототрофних слоєвищних безсосудистих організмів.

Ці рослини проростають зі субстрату та є основою для утворення складних гідробіоценозів, очисна здатність яких перевищує багатьох гідробіонтів, взятих окремо. Функція вищої водної рослинності у водотоках різноманітна та численна: вони поглинають та акумулюють біогенні елементи та органічні сполуки, є хорошими фільтраторами, можуть виступати також, як детоксикатори пестицидів та інших токсичних забруднювачів, які потрапляють у водойми та водотоки зі стічними водами [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

Водорості представлені у співвідношенні систем в таких посібниках, як «Водорості» Довідкова С.П. Васев.[1], в книзі «Ботаніка. Водорості та гриби» Костікова І. Ю. [2], а також «Outline of ascomycota.» Н. Т. Lumbsch, S. M. Nuhndorf [3].

Велика роль вищих водних рослин у процесах поглинання та накопиченні мінеральних елементів, що надходять у водотоки зі стоком з очисних станцій та природним шляхом та інших площ водозбору. Цим рослинам властива вибіркова здатність у поглинанні N, P, K та інших елементів. Найбільша інтенсивність поглинання макрофітами мінеральних речовин спостерігається в період розвитку та посиленого зростання. Найбільш активно поглинаються та використовуються рослинами N, P, K, Fe, Cl та Mn.

N і P акумулюються майже всіма рослинами в однаковій кількості (табл. 1). Інші біогени поглинаються і акумулюються в різних кількостях [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Таблиця 1

**Накопичення деяких біогенних елементів
вищими водними рослинами,
% на суху речовину**

Об'єкт дослідження	Елементи	
	N	P
Рогоз вузьколистий	2,52	0,41
Очерет звичайний	2,34	0,39
Сусак зонтичний	2,66	0,40
Рдест пронизливолистий	2,02	0,53

Наприклад, очерет звичайний, при врожаї 44 т/га по сухій речовині може вилучити з води N – 667 кг/га, P – 276 кг/га, K – 419 кг/га, Cl – 408 кг/га та Ca – 198 кг/га. Рогоз вузьколистий вилучає менше N, P та Cl, але Ca і особливо натрію він вилучає в 2-3 рази більше, ніж очерет [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Найбільша інтенсивність поглинання та акумуляція біогенів спостерігається на початку вегетації та

наприкінці літа, зазвичай у серпні. До кінця вегетації кількість біогенних елементів у надземній частині рослин різко знижується. Міжвидова відмінність за вмістом біогенних речовин протягом вегетаційного сезону пояснюється видовою специфікою обміну речовин та особливостями фенологічного розвитку рослин [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Відзначено вибіркову здатність вищих водних рослин до вилучення окремих хімічних елементів та їх сполук, що використовується останнім часом для створення біологічних ставків з вищою водною рослинністю. Крім того, стебла макрофітів, що знаходяться у воді, схильні до біообрастань, що складаються з мікроорганізмів-мінералізаторів, що також робить значний внесок у процеси самоочищення водойми [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

При обстеженні річки Ворскли з 2023 – 2025 р.р. знайдені макрофіти, що розподіляються на три основні групи [15, 16, 17]:

– занурені – гідрофіти (рдесники, рис. 1), мають довге тонке стебло та прозоре листя. До 70% обсягу біомаси цих рослин становлять повітряносповні порожнини, що дозволяє їм перебувати у зваженому стані; у своїй кореневій системі виконує частково якірні функції;

– напівнавантажені, або надводні – геліофіти (очерет, стрілолист та ін., рис. 2), мають над поверхнею води зелені листяні або квітконосні пагони і існує більша частина вегетаційного періоду у водо-повітряному середовищі. Більшість представників цієї групи мають жорстке стебло і займають домінуюче становище у водоймі [15, 16, 17];

– вільно плаваючі на поверхні – гідрофіти (ряска, водохарб, рис. 3) та рослини з вільно плаваючим листям (горець земноводний, кубочки, латаття) [15, 16, 17].

Водорості (перифітон), які проживають на поверхні річки виконують активну роль в очистці води. В заростях прибережно-водних рослин розвивається фітофільна фауна, яка також приймає участь в самоочистці води.

Біологічна очистка водойми за допомогою макрофітів в технологіях захисту водного об'єкта відбувається за рахунок життєдіяльності рослин, який тісно зв'язаний з фізико-хімічними процесами. Самоочищення води в біоплато може відбутись за рахунок анаеробних й аеробних умов. В анаеробному процесі відбувається розпад органічних речовин за рахунок участі бактерій, найпростіших. В такому випадку у процесі розпаду органічного матеріалу накопичуються проміжні продукти (аміак, сірководень, низькомолекулярні жирні кислоти та інші), котрі при наявності кисню окисляються далі. В аеробних умовах розпад органічного субстрату відбувається за рахунок кисню до простих з'єднань, які в майбутньому залучаються в біотичний круговорот. Прибережна водна рослинність виділяє при фотосинтезі кисень тим самим благополучно впли-

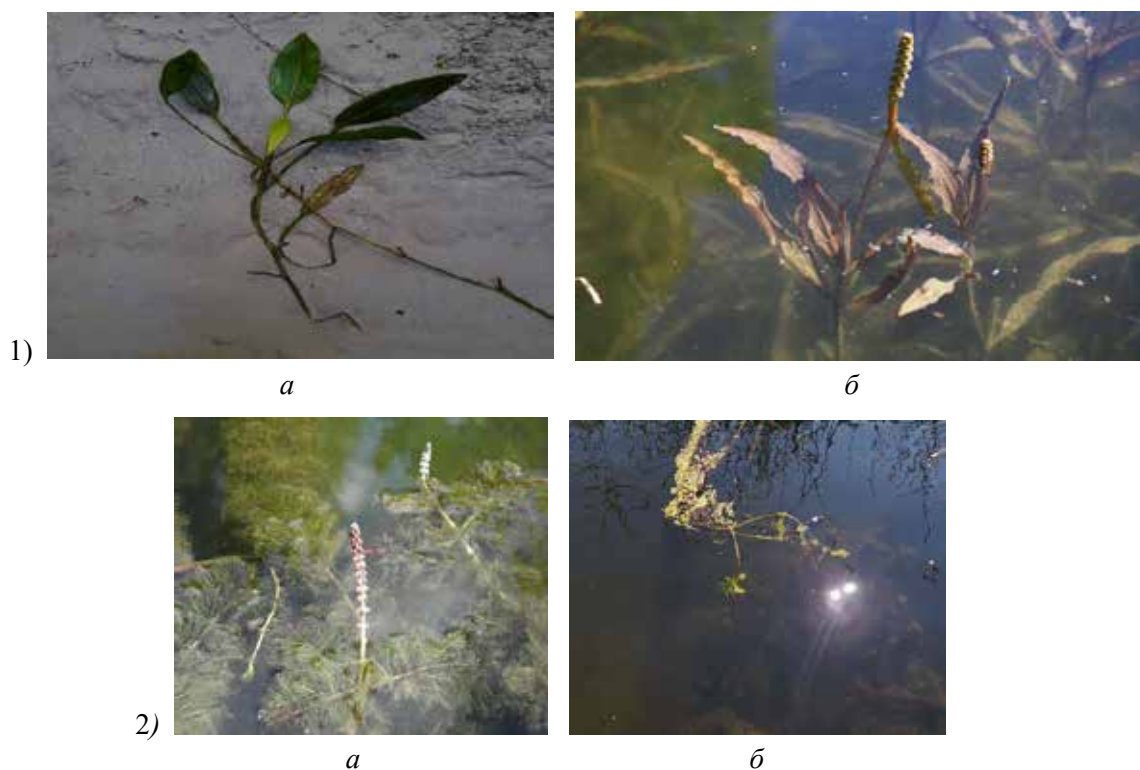


Рис. 1. Рдесники в річці Ворскла

1) зліва направо: а – рдесник блискучий (*Potamogeton lucens*), б – рдесник найдовший (*Potamogeton praelongus*), 2) зліва направо: а – рдесник гребінчастий (*Potamogeton pectinatus*), б – рдесник маленький (*Potamogeton pusillus*).



Рис. 2. Геліофіти в річці Ворскла

зліва направо: а – очерет звичайний (*Phragmites australis*); б – рогоз широколистий (*Tiphia latifolia*), в – рогоз вузьколистий (*Tiphia angustifolia*); г – сусак звичайний.

ває на кисневий режим прибережної зони водойми. Однак надмірний розвиток водоростей може призвести до вторинного забруднення водоймища після їх відмирання.

Рогози є біофільтром для очищення побутових та промислових стоків. Крім задовільного осадження органічних суспензій зі стічних вод, рогоз широколистий переважно акумулює з них N та Na [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Великі макрофіти здатні витягувати з води у великих кількостях біогенні елементи і цим запобігати та знижувати ступінь евтрофування водойми.

Вищі водні рослини, у тому числі рогози (рис. 1, 2, 3), споживаючи розчинені мінеральні речовини, виконують функцію демінералізації.

Рогози інтенсивно поглинають мінеральні солі стічних вод у гідромеліоративних каналах. Наприклад, рогоз вузьколистий вилучає з фільтрату 30% солей та 50% хлоридів.

В ході аналізу визначено, що рогоз звичайний (*Phragmites australis*) та рогоз широколистий (*Tiphia latifolia*), як і інші макрофіти, здатні поглинати з води біогенні елементи та фізіологічно активні речовини – феноли, отруйні солі важких металів,



а



б

Рис. 3. Гідрофіти в річці Ворскла

зліва направо: а – кубушка жовта (*Nuphar lutea*); б – водифарб звичайний (*Hydrocharis morsus-ranae*)

пестициди та інше [12, 13, 14, 15, 16, 17], при цьому значна частина цих елементів залишається у відмерлих залишках рослин, зокрема, у листі, стеблах та суцвіттях [12, 13, 14, 15, 16, 17].

За даними аналізу, у підземних коріннях очерету широколистого може накопичуватися: Fe – до 5150,0 мг/кг, Mn – до 5562,5 мг/кг, Ni – до 13,1 мг/кг, Zn – до 290,0 мг/кг, Cu – до 55,0 мг/кг, у листі: Fe – до 1964,8 мг/кг, Mn – до 8400,0 мг/кг, Ni – до 102,2 мг/кг, Zn – до 98,0 мг/кг, Cu – до 37,3 мг/кг, жіночих суцвіттях: Fe – до 450,0 мг/кг, Mn – до 680,0 мг/кг, Ni – до 36,7 мг/кг, Zn – до 50,0 мг/кг, Fe – до 23,7 мг/кг.

Рогоз звичайний (*Phragmites australis*) – досить висока рослина із листям 8-14 мм ширини. Пестична частина суцвіття 2,0-2,8 см ширини [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18]. Рослини нерідко мають габітус *T. angustifolia* або з першого погляду приймаються за «гібрид» очерету широколистого та вузьколистого. Пилкові зерна в фертильних зошитах, волоски оцвіттини чоловічих квіток тонкі, зазвичай прості. Приквітка при жіночих квітках відсутня. Рильце широколанцетне чи ромбічне. На верхніх ділянках окремих колосків жіночого суцвіття один або два пистилодії, а якщо пистилодіїв немає, то на верхівці можна розглянути єдину жіночу квітку у вигляді пучка волосків. Молоді маточкові суцвіття зелені або темно-зелені. Проміжок між пестичною та тичинковою частиною суцвіття, за даними одних авторів, становить 5(6)-7 мм, згідно інших авторів – 6-72 мм [12, 13, 14, 15, 16, 17].

Висота репродуктивного очерету широколистого варіює у межах: від 0,68 м до 2,8 м, загалом 1,7 м (табл. 2). Листя в числі 4-13, в середньому 8-10, можуть бути покриті сизовим нальотом, ширина листової пластинки в середній частині від 0,7 до 3,1 см. Пестична частина суцвіття циліндричної форми, під час цвітіння темно-зеленого кольору, під час плодоношення стає буро-коричневої, її довжина 5,9-34,0 (42,0) см, товщина 1,5-3,4 (4,0) см, загалом 2,7 см. Довжина тичинкової частини суцвіття 3,4-21,3 см загалом 11,7 см, товщина під час цвітіння становить 0,7-2,2 см. Проміжок між тичинковою та пестичною частиною суцвіття – 0-0,5 (0,6) см.

Рогоз широколистий (*Tipha latifolia*) – досить висока рослина із листям 8-14 мм ширини. Пестична частина суцвіття 2,0-2,8 см ширини [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Рослини нерідко мають габітус *T. angustifolia* або з першого погляду приймаються за «гібрид» рогозу широколистого та вузьколистого. Пилкові зерна в фертильних зошитах, волоски оцвіттини чоловічих квіток тонкі, зазвичай прості. Приквітка при жіночих квітках відсутня. Рильце широколанцетне чи ромбічне. На верхніх ділянках окремих колосків жіночого суцвіття один або два пистилодії, а якщо пистилодіїв немає, то на верхівці можна розглянути єдину жіночу квітку у вигляді пучка волосків. Молоді маточкові суцвіття зелені або темно-зелені.

У межах території м. Полтави на березі р. Ворскла висота репродуктивної *T. intermedia* ста-

Таблиця 2

Середньостатистичні показники морфометричних параметрів *Typha latifolia*

Параметри	N	M±m	Lim (min-max)	σ	CV, %
H (м)	421	1,471±0,01	0,68-2,80	0,29	19,96
n (шт)	3772	8,96±0,07	4-13	1,37	15,29
s (мм)	1263	20,32±0,15	7,00-31,00	3,95	19,44
Lf (см)	421	17,69±0,26	5,90-42,00	5,31	30,02
df (мм)	421	27,32±0,21	15,00-40,00	4,20	15,37
Lm (см)	421	11,71±0,17	3,40-21,30	3,38	28,86
dm (мм)	161	12,17±2,78	7,00-22,00	2,78	22,84
r (мм)	421	0,29±0,05	0-7,00	0,98	337,93

Таблиця 3

Середньостатистичні показники морфометричних параметрів *Typha intermedia*

Параметри	N	M±m	Lim (min-max)	σ	CV, %
H (м)	57	1,41±0,04	0,70-2,10	0,29	20,57
n (шт)	387	6,79±0,23	4-10	1,76	25,92
s (мм)	171	13,96±0,40	7,50-22,50	3,01	21,56
Lf (см)	57	12,58±0,52	6,00-25,00	3,92	31,16
df (мм)	57	24,34±0,73	5,00-34,00	5,49	22,56
Lm (см)	57	11,11±0,48	4,30-23,50	3,53	31,77
dm (мм)	23	9,30±0,35	6,00-13,00	1,69	18,17
r (мм)	57	7,18±0,83	0-32,00	6,28	87,47

новить 0,7-2,1 м, у середньому 1,4 м (табл. 3). Вид рогузу широколистого відрізняється листям зеленого або світло-зеленого кольору, але вони можуть бути і злегка сизуватими. Кількість листя на репродуктивному пагоні 4-10 см, ширина листової пластинки коливається в межах від 0,8 до 2,4 см, середньому 1,4 см. світло або темно-коричневого кольору. Довжина тичинкової частини суцвіття від 4,3 до 23,5 см, товщина 0,6-1,3 см. Проміжок між пестичною та тичинковою частиною суцвіття становить від 0,6 до 3,2 см, в середньому 0,7 см.

Головний висновок. В нашій країні однією з причиною виникнення проблеми забруднення річок зворотними (стічними) стоками є не дотримання нормативно-правової бази, насамперед, у частині економічного регулювання процесів стимулювання нормативного очищення стічних вод. Крім того, явно недостатня забезпеченість підприємств очисними спорудами та низька ефективність очищення стічних вод.

З кожним роком все більш важливого значення в Україні набуває своєчасне виявлення і прогнозування розвитку негативних процесів, що впливають на якість води у водних об'єктах і їх стан, тому здійснюється екологічний моніторинг на основі постійного відстеження з боку Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Державним агентством водних ресурсів й іншими контролюючими органами.

Всі водні об'єкти надзвичайно чутливі до будь-якої антропогенної діяльності. При цьому малі річки

втрачають функцію природних регуляторів водного режиму, забруднюються і втрачають здатність до самоочищення або повністю зникають.

Встановлено, що масовий розвиток в річці Ворскла в межах м. Полтави геліофітів – очерету звичайного (*Phragmites australis*); рогузу широколистого (*Typha latifolia*), рогузу вузьколистого (*Typha angustifolia*); сусаку звичайного може бути причиною надлишком надходження біогенних елементів, та крім того, стаючи причиною вторинного забруднення водойми. Розкладання відмерлих водних рослинних залишків потребує значного розчинного кисню в воді, та може викликати замор біоти з часом.

Рекомендовано збільшити посадку в Ворсклі гідрофітів, гігрофітів, наприклад: водянця жовтого, елодеї, валіснерії, водопериці, ряски, водяної лілії. Зміцнення берегів за допомогою макрофітів є найбільш простим та економічним способом очистки від біогенних елементів, але призводить до випаровування води рослинами рогузу вузьколистого. Також негативною здатністю є збільшення кількості мулу, що за певних умов призводить до загнівання рогузового опаду на біотопах, які заболочуються. Усі рогузи створюють серйозні проблеми при зрошенні полів, оскільки швидкого розростаються в іригаційних системах та спорудах, але можуть бути використанні в біоплато.

Перспективи використання результатів дослідження. Данні дослідження можуть використовуватись для розробок екологічних технологій захисту водного об'єкта.

Література

1. Водорості. Довідник. С. П. Вассер та ін. Київ : Наукова думка, 1989. 250 с.
2. Ботаніка. Водорості та гриби / за ред. І. Ю. Костиков. Київ : Арістей, 2006. 100 с.
3. Пилип'юк В.В., Лобода Н.С. Оцінка самоочисної здатності річок Псел та Ворскла. Матеріали міжнародної наукової конференції студентів і молодих вчених «Сучасна гідрометеорологія сучасні проблеми та шляхи їх вирішення». Одеськ. держ. екологічний університет. Одеса : ТЕС, 2014. С. 116-117.
4. Вплив радіонуклідного забруднення на гідробіотів зони відчуження. Радіонукліди у водних екосистемах України / М. І. Кузьменко, В. Д. Романенко, В. В. Деревець та ін.; Київ : Чорнобильінтерінформ, 2001. 318 с.
5. Жежера М.Д. Водорості різнотипних водойм Лівобережного Полісся : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня к-та б. наук. Київ, 2015. 25 с.
6. Никифоров В. В., Дігтяр С. В., Мазницька О. В., Козловська Т. Ф. Біоіндикація та біотестування : навчальний посібник. Кременчук : Видавництво ПП Щербатих О. В., 2016. 76 с.

7. Клименко, М.О., Прищепя А.М., Клименко О.М., Стецюк Л.М. Оцінювання стану водних екосистем за показниками біо-тестування. Рівне : НУВГ, 2014. 170 с.
8. Комплексна оцінка токсичності водних зразків за допомогою рослинних і тваринних тест-організмів / Осмалений М.С., Головков А.В., Нанісва М.Р. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2015. Т. 16. С. 74–77.
9. Білоус О.П., Барінова С.С., Клоченко П.Д. Біоіндикаційний аналіз верхньої ділянки річки Південний Буг по фітопланктону. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. № 1, 2014. С. 76–88.
10. Клоченко П.Д., Митківська Т.І. Фітопланктон приток верхнього Дніпра. *Укр. ботан. журнал*. № 50, 1993. С. 69–79.
11. Lumbsch, T.H. and Huhndorf, S.M. Outline of Ascomycota–2007. *Myconet, The Field Museum, Department of Botany*. Chicago. 2007. P. 1– 58.
12. Körting W. Abwasserschäden am Fisch. *Münch. Beitr. Abwasser Fisch und Flussbiol.* 1972. P. 82–87.
13. Chu S. P. The influence of the mineral composition of the medium on the growth of planktonic algae. *Part I. Methods and culture media J. Ecol.* 1942. Vol. 30, P. 284–325.
14. Burton G.A. Jr., Stemmer B.L., Winks K.L. A. Multitrophic level evaluation of sediment toxicity in Wankegen and Indiana harbors. *Environ Toxicol. Chem.* 1989. P. 1057– 1066.
15. Abbracchio M.P., Hansen J.S., Costa S.M. Cytoplasmic dissolution of phagocytized crystalline nickel sulfide partickes: a prerequisite for nuclear uptake of nikel. *Toxicol. J. Environ. Health*. 1982. P.659 – 663.
16. Takeuchi T. Distribution of mercury in the environment of Minamata Bay and the Inland Ariake Sea. *Environmental mercury contamination*. 1972. P.79–81.
17. Yedeler A. Anreicherung und Elimination von Zink in Pflancen Sedimenten und Fischfleisch. *Dipl. Arb. Berich. Biologil.* München. 1977. P.24–25.

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ НІТРАТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ДЖЕРЕЛ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ В ЗОНІ АНТРОПОГЕННОГО ВПЛИВУ

Яковлєв В.В., Дмитренко Т.В.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Чорноглазівська, 17, 61002, м. Харків
yakovlev030157@gmail.com, tetyana.dmytrenko@kname.edu.ua

Протягом останніх десятиліть використання й споживання води з децентралізованих джерел населенням постійно зростає. Війна та пов'язані з нею руйнування інфраструктури водопостачання та водовідведення тільки підтверджують актуальність вивчення придатності води таких джерел для використання населенням. Ці джерела переважно базуються на першому від поверхні землі водоносному горизонті. Нітратне забруднення ґрунтових вод в українських селах більшою мірою обумовлене відсутністю систем водовідведення. Дослідження базувалися на аналізі масиву даних атестованої науково-виробничої лабораторії ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ» за переліком показників у межах стандартного аналізу природних вод. У процесі дослідження виконано кореляційний аналіз для виявлення зв'язку вмісту нітратів та інших показників соляного складу ґрунтових вод – вмісту хлоридів, солей жорсткості й величини сухого залишку. Виконано просторовий і статистичний аналіз на прикладі Харківської області, який показав, що закономірною є стратифікація вмісту нітратів за глибиною. Порівняння з якістю води в природних джерелах свідчить про те, що вміст нітратів збільшується в самих каптажних спорудах – колодязях внаслідок накопичення біологічної субстанції, для якої ємність каптажу наближена до поверхні і є середовищем проживання. Кількісно охарактеризована залежність вмісту нітратів у воді від глибини колодязів і свердловин. Обґрунтовано необхідність удосконалення нормативів і застосування практичних заходів щодо удосконалення конструкцій каптажів децентралізованого водопостачання. Для більш точної ідентифікації джерел забруднення на конкретних об'єктах запропоновано дослідження ізотопного складу азоту, кисню і водню. *Ключові слова:* нітратне забруднення, колодязь, джерело, свердловина, децентралізоване водопостачання, ізотопні методи.

Some Features and Characteristics of Nitrate Pollution of Decentralised Water Supply Sources in the Areas of Man-Caused Impact. Yakovlev V., Dmytrenko T.

In recent decades, the use and consumption of water from decentralised sources by the population has been constantly growing. The war and the associated destruction of water supply and drainage infrastructure only confirm the relevance of studying the suitability of such sources for use by the population. These sources are mainly based on the first aquifer from the surface of the earth. Nitrate pollution of groundwater in Ukrainian villages is largely due to the lack of drainage systems. The survey was based on the analysis of the data array obtained by the certified R&D laboratory – the Laboratory of Water Quality of LLC 'Plaia' according to the list of indicators within the standard analysis of natural waters. In this survey, a correlation analysis was performed to identify the relationship between the content of nitrates and other indicators of the salt composition of groundwater, viz. chlorides, hardness salts and the amount of dry residue. The spatial and statistical analyses were carried out exemplified by the Kharkiv region, which showed that stratification of nitrate content by depth is regular. Comparison with water quality in natural sources indicates that nitrate content increases in the capping structures themselves – wells as a result of accumulation and destruction of organic substances of biological origin; for microorganisms the capacity of the capping is close to the surface and is a habitat. The dependence of nitrate content in water on the depth of wells and boreholes is quantitatively characterised. The necessity of improving the standards and applying practical measures to improve the design of decentralised water supply catchments is substantiated. For more accurate identification of pollution sources at specific sites, it is proposed to study the isotopic composition of nitrogen, oxygen, and hydrogen. *Key words:* nitrate pollution, water well, water source, drillhole, decentralised water supply, isotope methods.

Постановка проблеми. Відсутність систем водовідведення і хімізація землеробства в сільській місцевості є головними факторами забруднення ґрунтових вод, які використовуються для господарських і питних цілей. Відомо, що якість води з джерел індивідуального водопостачання не контролюється органами санітарного контролю, і українське законодавство не передбачає такого контролю. Проблема ускладнюється необізнаністю населення і втратою традиції чистки каптажів індивідуального користування, якими у багатьох випадках є колодязі, а також каптажі джерел. Автори роботи аналізують дані якісного складу води у джерелах децентралізованого

водопостачання на прикладі Харківського регіону з метою виявлення просторових закономірностей нітратного забруднення і статистичних кореляцій між вмістом нітратів та іншими показниками хімічного складу води.

Актуальність дослідження. Джерелами нітратного забруднення колодязних вод можуть бути фільтрація стічних вод у неканалізованих селах і передмістях, органічне забруднення від домашньої худоби, тваринницьких ферм, органічних добрив і практично повсюдний вплив хімізації у землеробстві [1,2].

Лабораторні аналізи води з децентралізованих джерел водопостачання, виконані за переліком пара-

метрів згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» [3], показали, що найчастіше виявляються порушення за рівнем жорсткості, вмістом нітратів, величиною сухого залишку, окиснюваності, вмістом сульфатів, бактеріологічними показниками, та ін. Серед цього переліку найбільшою проблемою є нітрати, які належать до токсичних показників і вкрай важко видаляються з води. Навіть, використання зворотного осмосу, яке усуває всі розчинені компоненти й тим самим робить воду фізіологічно непридатною, видаляє нітрати не повністю. Нітратне забруднення є однією з головних проблем якості питної води з децентралізованих джерел водопостачання і, навіть, причиною дитячої смертності [4–6]. Харківська область не є виключенням, адже майже все сільське і частина міського населення області використовують воду з колодязів, неглибоких свердловин і каптажів джерел в господарсько-побутових та питних цілях. Таким чином, проблема нітратного забруднення води залишається завжди актуальною.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тема роботи відповідає основним принципам і напрямкам державної політики щодо охорони, раціонального використання та відновлення водних ресурсів України, зокрема, Водному Кодексу України (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 24, ст. 189) [7], Концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28 квітня 2021 р. № 388-р.) [8], Директиви Ради від 12 грудня 1991 року щодо захисту вод від забруднення, спричиненого нітратами з сільськогосподарських джерел (Директива № 91/676/ЄЕС) від 31.12.1991 р. [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Необхідно зазначити, що нітрати, які можна визначити у воді відносно простими аналізами, є трасерами всякого іншого забруднення підземних вод, для виявлення якого потрібні спеціальні кропітки й коштовні дослідження. Це є додатковим стимулом для вивчення нітратного забруднення води.

Зважаючи на актуальність проблеми нітратного забруднення колодязних вод, доцільним є вивчення питання можливого удосконалення конструкцій традиційних колодязів з точки зору сучасного рівня забрудненості ґрунтів зони аерації [10].

Найкращий шлях боротьби з нітратним забрудненням – усунути його причину, тобто запобігти потраплянню азотних сполук до ґрунтів і ґрунтових вод. Для цього необхідно визначити джерела забруднення і шляхи їх надходження. На думку авторів, це можливо зробити двома шляхами. Перший, традиційний гідрогеологічний – вивчення картини розповсюдження нітратів у підземній гідросфері конкретної ділянки, яка вкаже на джерела і шляхи забруднення. Другий – використання ізотопного методу з визна-

ченням співвідношення ізотопів кисню й азоту, а також водню, що вкаже на вік і, головне, на походження цієї забрудненої води. Подібні дослідження у регіоні вже виконувалися і показали свою ефективність [11].

Завданням роботи є реалізація першого вище згаданого методу на прикладі Харківського регіону, а саме вивчення картини розповсюдження нітратів у підземній гідросфері та виявлення кореляційних зв'язків між показниками хімічного складу води для визначення можливих джерел і шляхів забруднення підземних вод.

Матеріали та методика дослідження. Дослідження базуються на аналізі масиву даних – протоколів хімічного складу води, наданих атестованою науково-виробничою лабораторією ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ». Перелік показників відповідає стандартному аналізу природних вод. Аналітичне визначення вмісту нітратів і інших компонентів виконувалося за методиками та стандартами визначення показників безпечності та якості питної води.

Аналізувалися дані протоколів якості води з приватних колодязів, свердловин і природних джерел у Харківському регіоні (Харківський, Чугуївський, Берестинський та Ізюмський адміністративні райони), отримані за період з 2018 по 2022 рр.

Проби води відбиралися співробітниками кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова та надходили від приватних замовників – власників децентралізованих джерел водопостачання. Відбір води з децентралізованих джерел (колодязів, неглибоких свердловин, природних джерел) проводився згідно зі стандартною методикою [3] у пластикові пляшки об'ємом 2,0 дм³.

Схематично розташування місць відбору проб води з джерел децентралізованого водопостачання показано на рис. 1. Для зручності градація вмісту нітратів у воді показана з використанням різних кольорів.

Оцінка якісного складу води за окремими показниками здійснювалася згідно з чинними нормативами [3].

Залежність концентрації нітратів від глибини каптажної споруди виявлялася графічно на побудованих графіках, а також статистично для кластерів різних глибин каптажів.

Авторами виконаний кореляційний аналіз для виявлення зв'язку вмісту нітратів та інших показників соляного складу ґрунтових вод – вмісту хлоридів, сульфатів, солей жорсткості й величини сухого залишку. Коефіцієнт парної кореляції r визначався за формулою 1:

$$r = \frac{\sum (x_i - x_{cs}) * (y_i - y_{cs})}{\sqrt{\sum (x_i - x_{cs})^2 * \sum (y_i - y_{cs})^2}}, \quad (1)$$

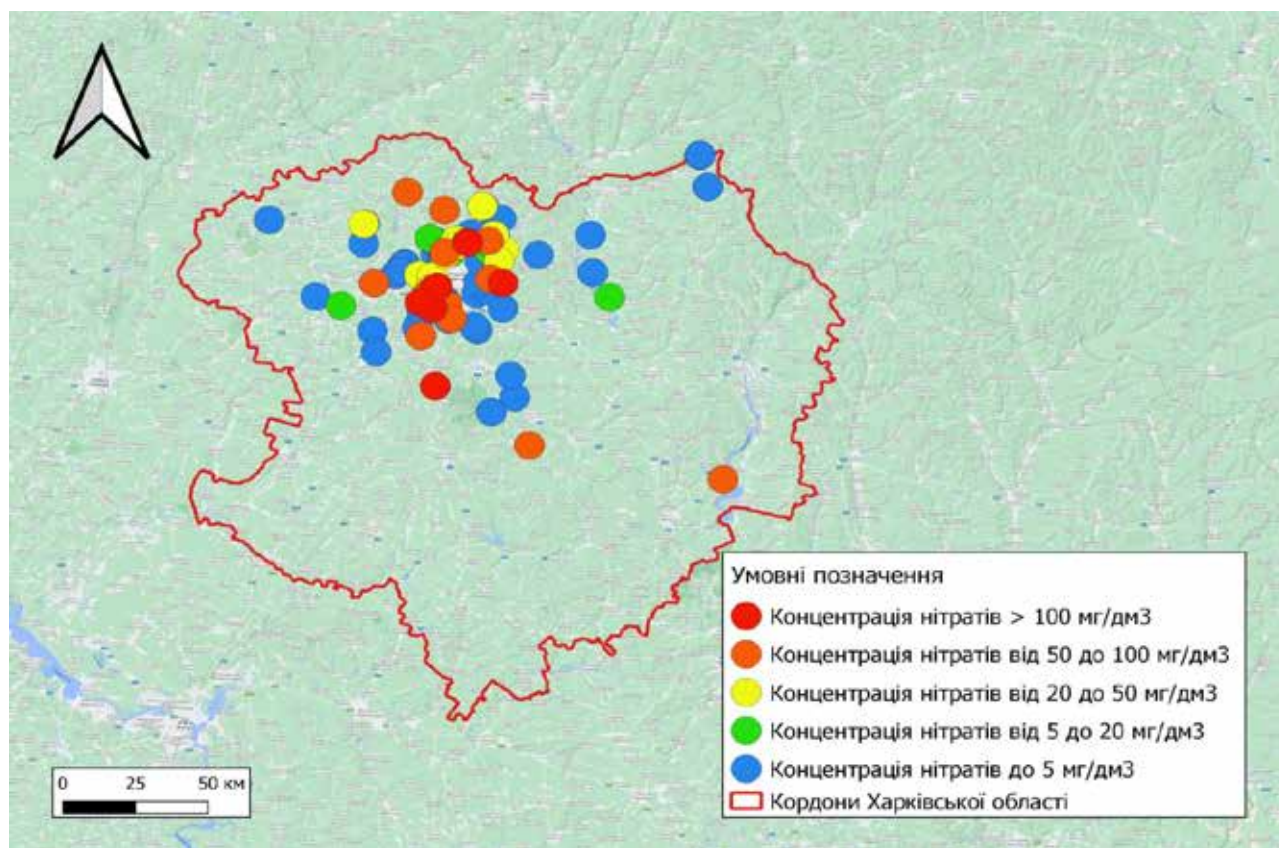


Рис. 1. Схема розташування опробуваних водопунктів – джерел децентралізованого водопостачання і вміст нітратів у воді

де x – залежна змінна, яка відповідає вмісту нітратів;

y – незалежна змінна, яка відповідає показникам соляного складу питної води;

$x_{ср}$, $y_{ср}$ – середні значення змінних.

Викладення основного матеріалу. За результатами аналізу органолептичних, фізико-хімічних та санітарно-токсикологічних показників якості води, встановлено, що концентрація нітратів у відібраних пробах води розподіляється наступним чином:

- у 93 каптажах – до 5 мг/дм³;
- у 29 каптажах – від 5 до 20 мг/дм³;
- у 24 каптажах – від 20 до 50 мг/дм³;
- у 17 каптажах коливається від 50 до 100 мг/дм³;
- концентрація понад 100 мг/дм³ зафіксована у 12 джерелах водопостачання.

У цілому, за вмістом нітратів порушення норм якості питної води (більше ніж 50 мг/дм³) відбувається у 16,6 % випадків. З рис. 1 видно, що вміст нітратів у воді колодязів не виявляє якоїсь закономірності за площею. Це наводить на думку про можливу залежність вмісту нітратів від конструктивних і санітарних особливостей конкретних каптажів.

Якщо порівняти вміст нітратів у воді колодязів і свердловин глибиною до 20 м (рис. 2), можна побачити, що середня концентрація нітратів у колодязях значно більша. Це може бути пов'язано з більшою

відкритістю цих каптажів, що сприяє потраплянню атмосферного повітря, сонячного світла, пилу, комах. Тут більш застійний режим накопиченої води, підвищена температура в теплий період року, і тому існують порівняно сприятливі умови для розвитку бактерій і водоростей. Нітрати є продуктом розпаду біоти й накопичуються на дні та стінках колодязів.

Аналіз картини забруднення за глибиною виявив певну закономірність.

На рис. 2–5 наведено графіки залежності вмісту нітратів у воді від глибини колодязів і свердловин. З графіків видно, що загалом, зі збільшенням глибини водозабірних споруд, вміст нітратів у воді зменшується.

Визначено середній розрахунковий вміст нітратів у підземних водах Харківської області для водопунктів різної глибини (рис. 6).

В табл. 1 наведено результати кореляційного аналізу для виявлення зв'язку вмісту нітратів та інших показників соляного складу ґрунтових вод – вмісту хлоридів, солей жорсткості й величини сухого залишку.

З табл. 1 видно, що з показником жорсткості нітрати не корелюють.

Помірний зв'язок за шкалою Чеддока між концентрацією нітратів та сухим залишком спостерігається в інтервалі глибин 21–50 м, а на менших і біль-

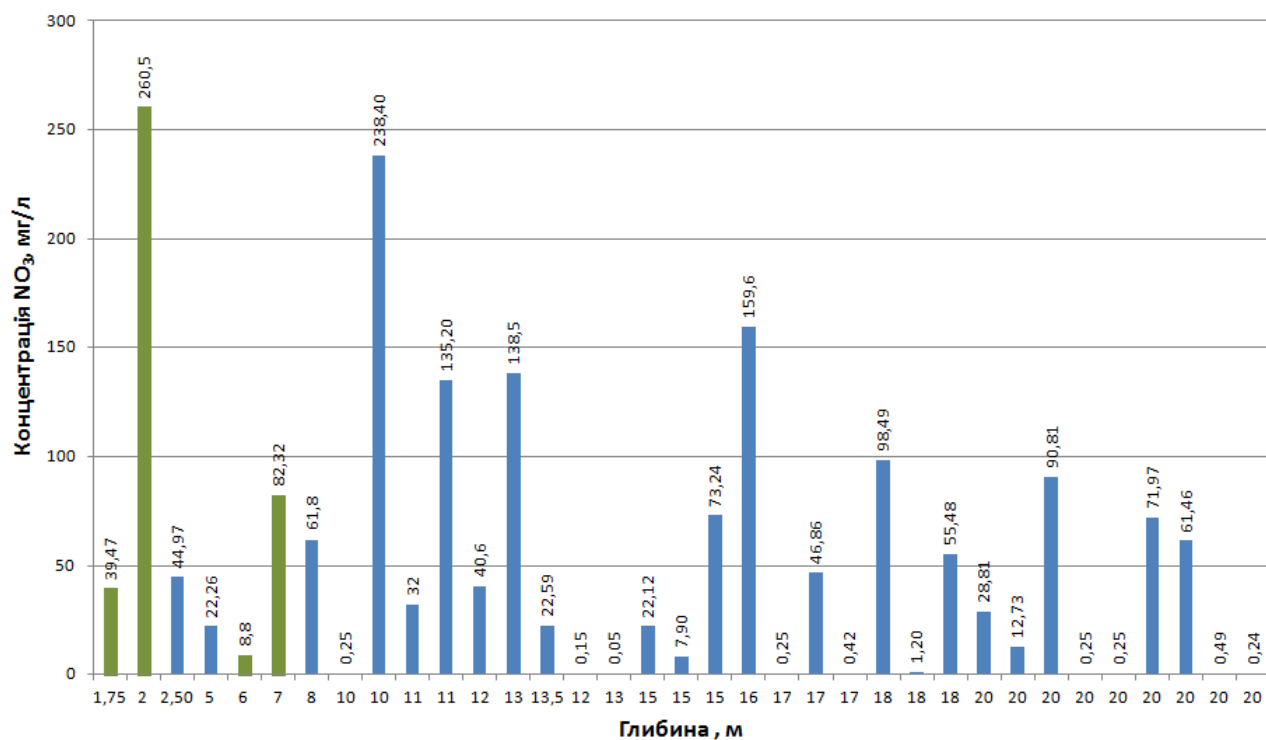


Рис. 2. Вміст нітратів у підземних водах у колодязях і свердловинах глибиною від 0 до 20 м

■ – колодязь, ■ – свердловина

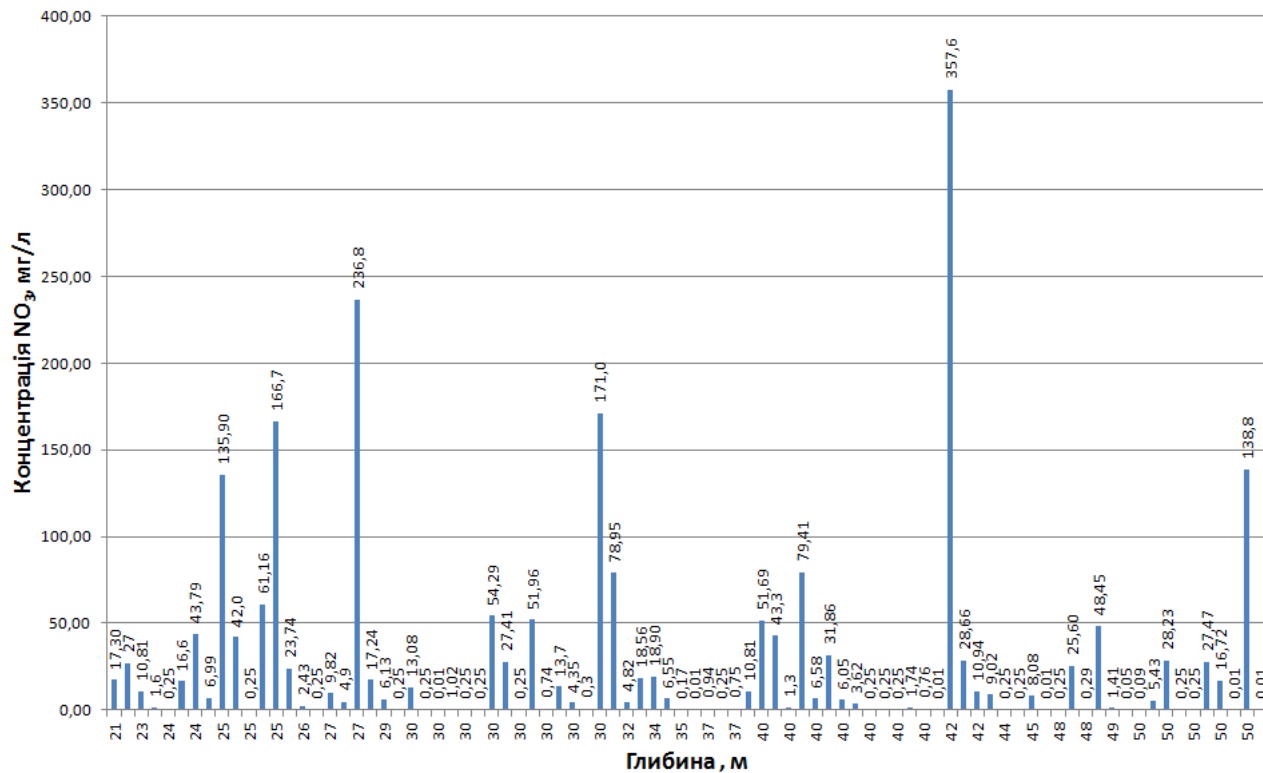


Рис. 3. Вміст нітратів у підземних водах у свердловинах глибиною від 21 до 50 м

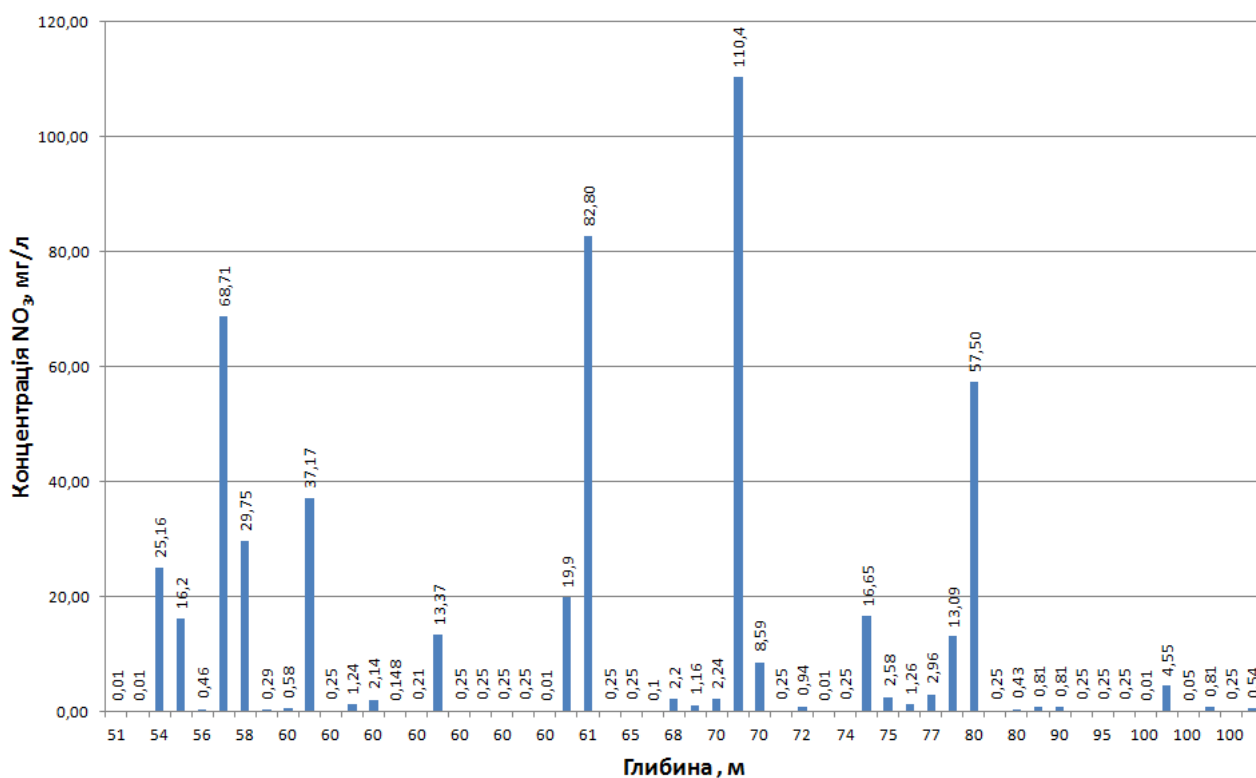


Рис. 4. Вміст нітратів у підземних водах у свердловинах глибиною від 51 до 100 м

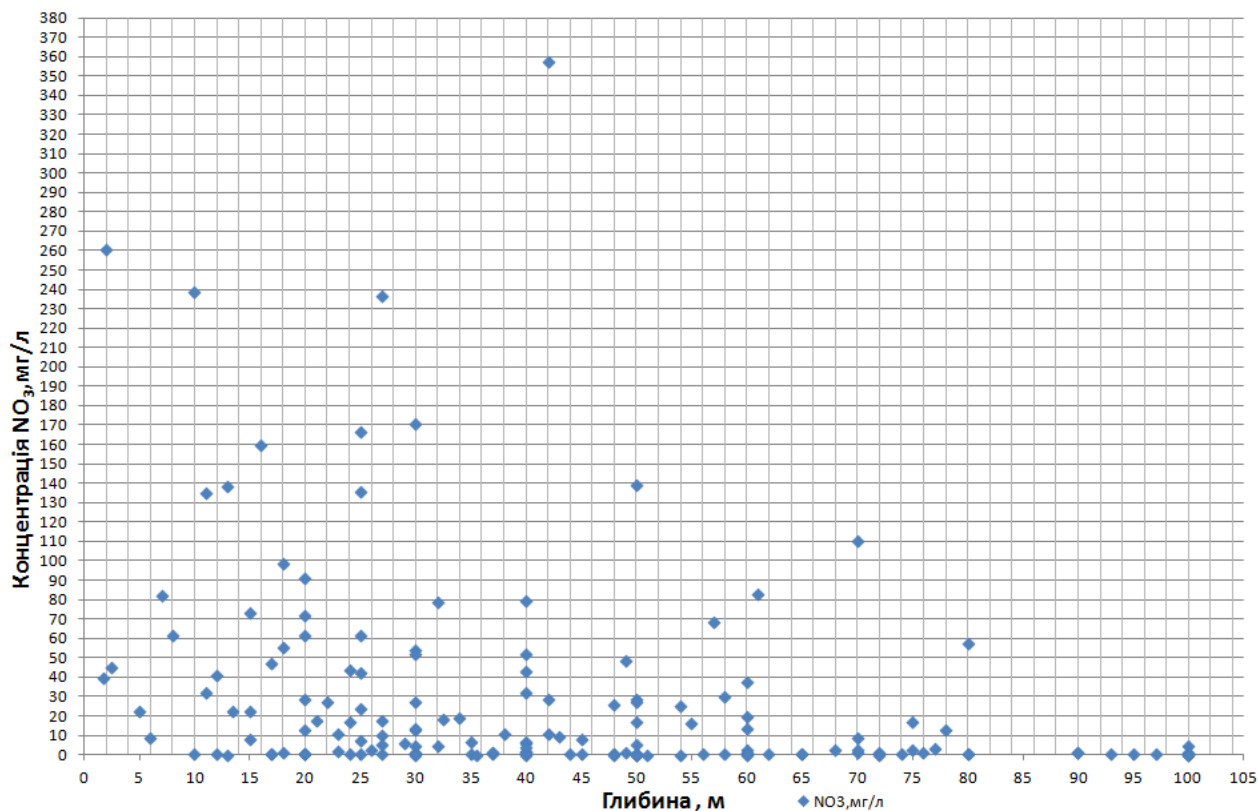


Рис. 5. Залежність вмісту нітратів у підземних водах на території Харківської області від глибин каптажних споруд

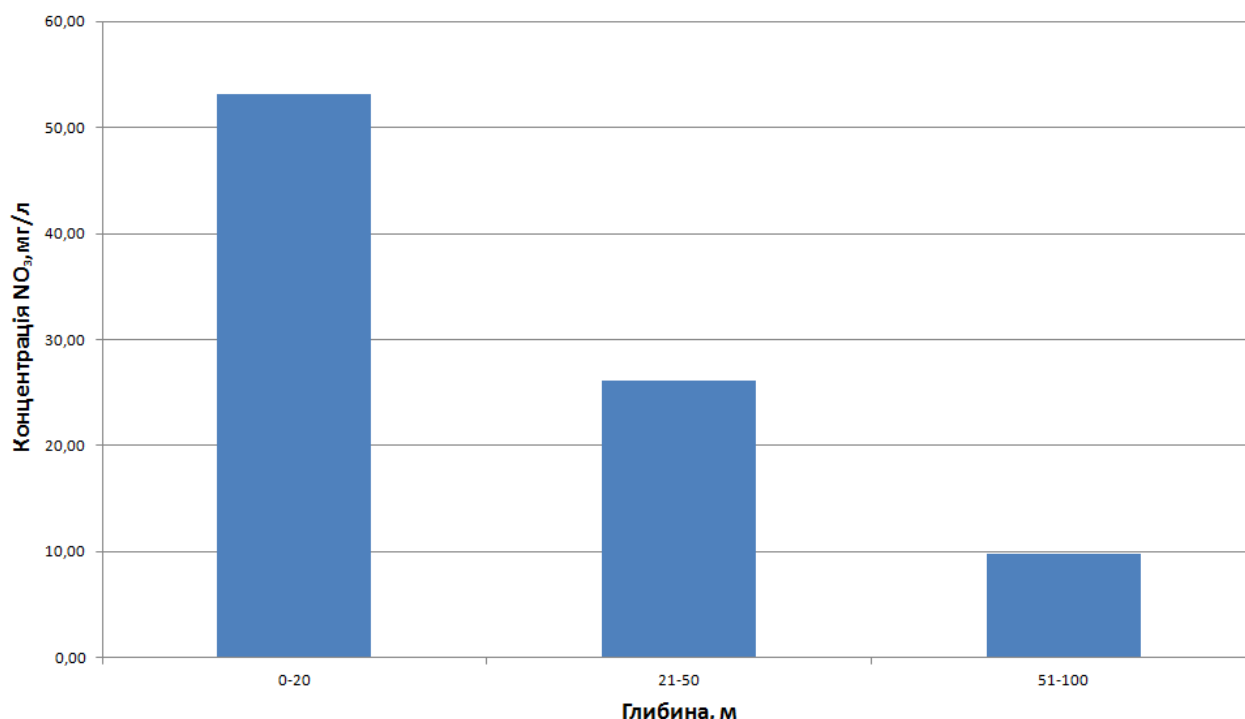


Рис. 6. Середній розрахунковий вміст нітратів у підземних водах Харківської області для водопунктів різної глибини

Таблиця 1

Розрахункові коефіцієнти парної кореляції вмісту нітратів з іншими показниками

Глибини каптажів, м	Кореляція з жорсткістю загальною	Кореляція з величиною сухого залишку	Кореляція з вмістом хлоридів
0–20	0,29	0,27	0,50
21–50	0,47	0,52	0,51
50–100	-0,05	0,11	-0,16

ших глибинах він відсутній. Для умов «прямого» гідрохімічного профілю у Харківському регіоні відсутність кореляції між вище вказаними параметрами на глибинах 0–20 м можна пояснити низькими значеннями сухого залишку у зоні інтенсивного водообміну і контрастними значеннями вмісту нітратів. На глибинах більше ніж 50 м у зоні менш інтенсивного водообміну вплив поверхневого забруднення явно менший, що може пояснюватися впливом процесу денітрифікації, обумовленого діяльністю специфічних бактерій родів *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Bacillus* і *Micrococcus*. Це процес повільний, але у зоні відносно уповільненого руху підземних вод він ефективно зменшує кількість нітратів.

Стосовно зв'язку «нітрати-хлориди» можна зазначити, що на глибинах до 50 м він є помірним. Стічні побутові води й стоки з фермерських господарств звичайно збагачені хлоридами, тому можна говорити про зв'язок нітратів з цими стоками.

Графіки залежності вмісту нітратів від загальної жорсткості, хлоридів і

сухого залишку у воді колодязів і неглибоких свердловин у Харківській області (за даними ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ»») наведено на рис. 7–9.

В лівій частині графіку на рис. 7 можна побачити великий масив вод з відносно підвищеною жорсткістю і невеликим (фоновим) вмістом нітратів – до 30 мг/дм³. Тобто, вмісти нітратів і солей жорсткості не пов'язані. Водночас права частина графіку демонструє зростання вмісту нітратів зі збільшенням загальної жорсткості. Загалом така картина свідчить про складний характер співвідношення нітратів і солей жорсткості, що залежить від багатьох факторів: речового складу і проникності ґрунтів, інтенсивності азотного забруднення, глибини відбору води, інтенсивності діяльності азот поглинаючих бактерій.

На графіку рис. 8 також простежується загальне збільшення вмісту нітратів зі збільшенням фону хлоридів. Водночас, по аналогії з жорсткістю, для вмісту нітратів менше ніж 30 мг/дм³ для значної частини проб характерні відносно високі (непри-

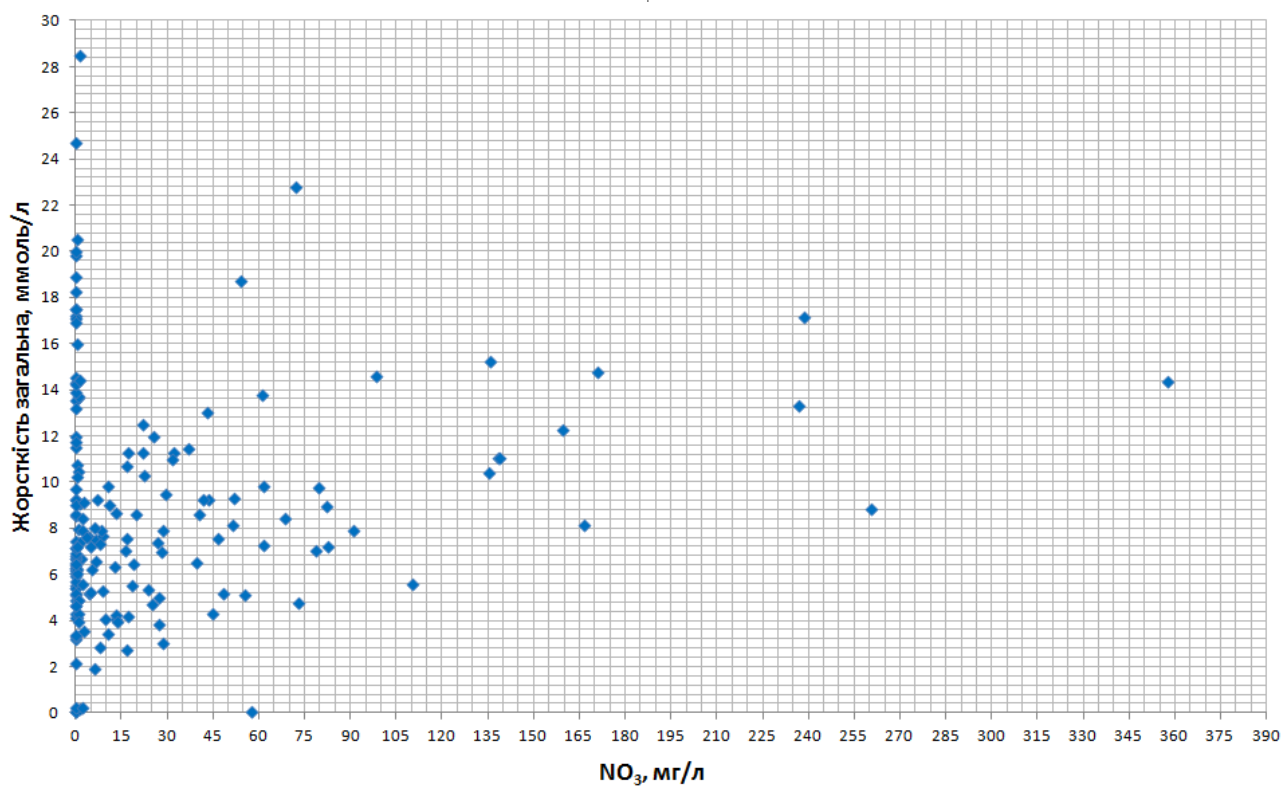


Рис. 7. Залежність вмісту нітратів від загальної жорсткості води у колодязях і неглибоких свердловинах у Харківській області

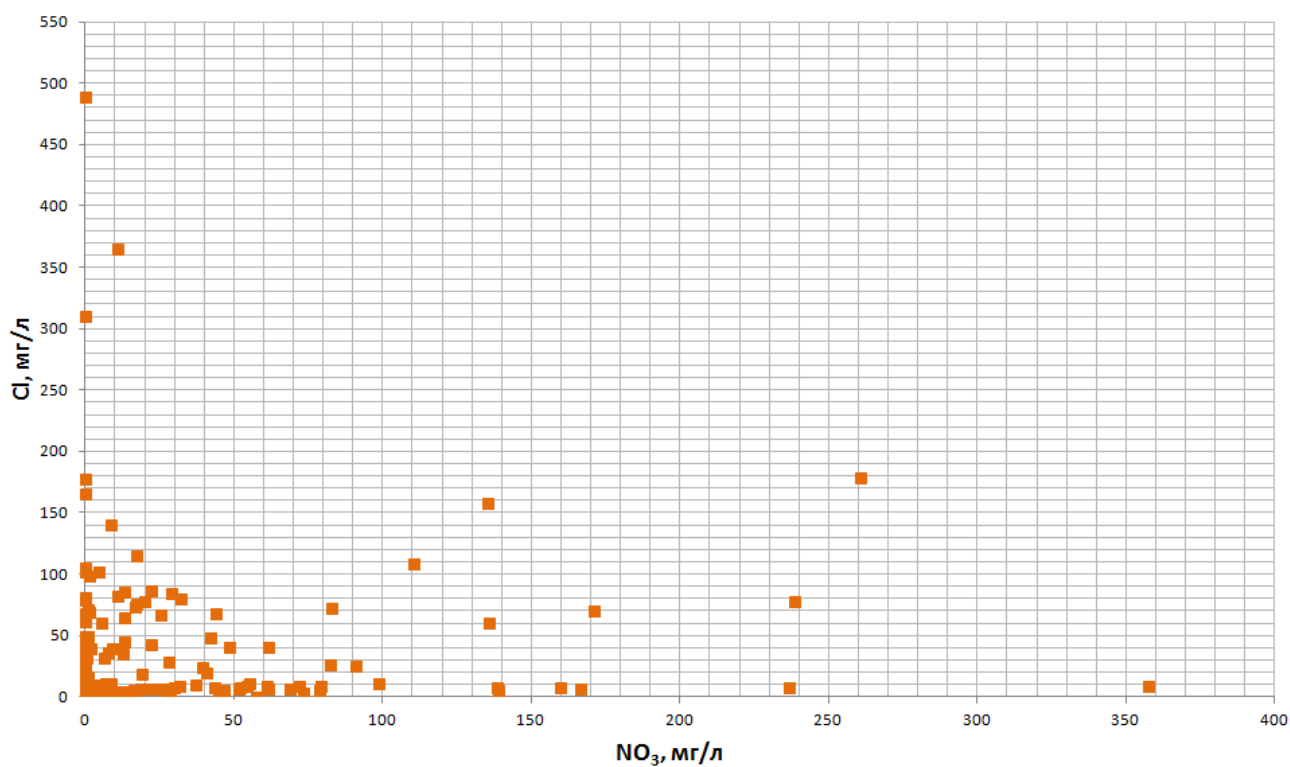


Рис. 8. Залежність вмісту нітратів від хлоридів у колодязях і неглибоких свердловинах у Харківській області

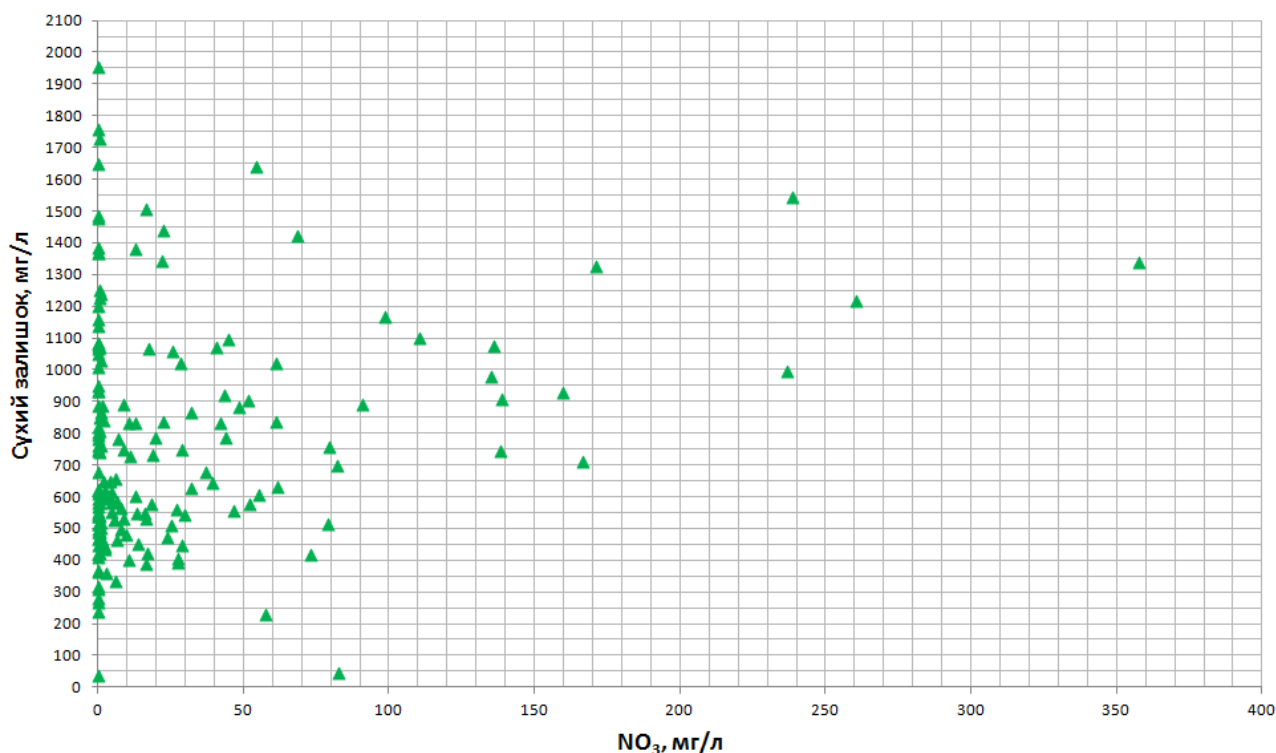


Рис. 9. Залежність вмісту нітратів від сухого залишку у колодязях і неглибоких свердловинах у Харківській області

родні) вмісти хлоридів. Загалом, така картина відображає фонові вмісти хлоридів на різних глибинах – від 25 до 100-120 мг/дм³ і фонові вмісти нітратів – до 30 мг/дм³.

Картина залежності вмісту нітратів від величини сухого залишку в цілому аналогічна: для певної частини проб простежується загальне збільшення вмісту нітратів зі збільшенням величини сухого залишку. В той самий час, по аналогії з попередніми графіками для вмісту нітратів менше ніж 30 мг/дм³ для значної частини проб характерні відносно високі (неприродні) значення сухого залишку без збільшення вмісту нітратів. Тобто підтверджується складний характер зв'язку суми солей і нітратного забруднення, яке залежить від багатьох факторів: речового складу і проникності ґрунтів, інтенсивності азотного забруднення, глибини відбору води.

Головні висновки.

1. Загальною закономірністю є зменшення у підземній воді вмісту нітратів зі збільшенням глибини каптажів. Окремі випадки відносно великого вмісту нітратів у свердловинах глибиною до 80 м вірогідно пов'язані з відсутністю ізоляції в них від забруднених вод перших від поверхні горизонтів, які перетікають в експлуатаційний горизонт зовні обсадних колон. Зважаючи на розповсюдженість такої ситуації, в Україні необхідно встановлення норм і практичних заходів для конструктивного удосконалення

каптажів з погляду захищеності підземних вод від поверхневого забруднення.

2. У Харківському регіоні для підземних вод на глибинах до 50 м існує значущий зв'язок між вмістом нітратів і хлоридів, що ймовірно свідчить про джерело надходження нітратів – стічні побутові й тваринницькі стоки.

3. Хаотичний розподіл величини концентрації нітратів у підземних водах за площею також вказує на фрагментарний характер розподілу джерел азотного забруднення за площею. Окрім побутових та тваринницьких стоків, фільтрації води з полів і городів, джерелом азотного забруднення може бути і біота, яка проникає до колодязів зі світлом і атмосферним повітрям.

4. Для більш точної ідентифікації джерел забруднення підземних вод на конкретних об'єктах доцільно залучити дослідження ізотопного складу азоту, кисню і водню.

Перспективи використання результатів досліджень. Результати досліджень можуть бути використані органами виконавчої влади та об'єднаних територіальних громад для вирішення питань, пов'язаних з організацією водопостачання в населених пунктах України, розробкою природоохоронних рішень.

Подяки. Автори висловлюють подяку Кулик А. С. за технічну допомогу в обробці матеріалів.

Література

1. Яковлев В.В. Перспективні джерела природних вод для питного водопостачання України, їх охорона і раціональне використання: дис. ... д-ра геол. наук: 21.06.01 / Харків. нац. ун-т ім. В.Н. Каразіна, 2017. 351 с.
2. Стан підземних вод України: щорічник / під ред. С.І Примушко, Т.Д. Білошапської, В.Ф. Величко. Київ: Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 2011. 120 с.
3. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. *Офіційний вісник України*. 2010. № 51. Ст. 1717. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
4. Яковлев В. В., Дмитренко Т. В. Природні та антропогенні зміни ґрунтових вод у зв'язку з проблемою водопостачання на прикладі с. Кишенці Уманського району Черкаської області. *Екологічні науки*. 2024. № 1 (52). Т. 2. С. 51-58. URL: http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2024/1/part_2/12.pdf
5. Яковлев В. В., Дмитренко Т.В. Причини різної якості колодязних вод : матеріали І Міжнар. наук.-практ. конф. «Екологічні проблеми сучасності», м. Луцьк, 10 трав. 2023 р. Луцьк, 2023. С. 42-44. URL: <http://repository.vsau.org/getfile.php/33521.pdf>
6. Яковлев В.В., Дмитренко Т.В. Вивчення нітратного забруднення колодязних вод у Харківському регіоні : зб. матер. VIII Міжнар. конгресу «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», м. Львів, 16-18 жовт. 2024 р. Львів, 2024. С. 93. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/oct/36233/staluy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshcha-enerhooshchadnist-20241.pdf>
7. Водний Кодекс України : Закон України від 06.06.1995 р. № 213/95-ВР. *Відомості Верховної Ради України*. 1995. № 24. Ст. 189. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text>
8. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової програми «Питна вода України» на 2022–2026 роки: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 28.04.2021 р. № 388-р. *Офіційний вісник України*. 2021. № 37. Ст. 2250. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/388-2021-%D1%80#Text>
9. Директиви Ради від 12 грудня 1991 року щодо захисту вод від забруднення, спричиненого нітратами з сільськогосподарських джерел (Директива № 91/676/ЄЕС). *Офіційний вісник Європейських Співтовариств*. 1991 р. L 375, стор. 1. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/987_002-91#Text
10. Яковлев В. В., Цифра Ю. М., Дмитренко Т. В. Удосконалення конструкцій каптажів децентралізованого водопостачання в сучасних екологічних умовах. *Екологічні науки*. 2023. № 1 (46). С. 59-63. URL: <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2023/1/10.pdf>
11. Diadin, D., Vystavna, Y. Long-term meteorological data and isotope composition in precipitation, surface water and groundwater revealed hydrologic sensitivity to climate change in East Ukraine. *Isotopes in Environmental & Health Studies*. 56 (2). 2020. pp. 136–148. URL: <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1732369> (Scopus)

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВОЄННИХ ДІЙ

УДК 504.064.2:355.48(477)

ЕКОЛОГІЧНА ТА ОБОРОННА СТІЙКІСТЬ: НОВА ПАРАДИГМА ДЛЯ ПРИФРОНТОВИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ

Шарий Г.І., Козлов В.В.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
пр. Першотравневий, 24, 36000, м. Полтава
shariy.grigoriy61@gmail.com, vladislavkozlov2101@gmail.com

У статті розглядається нова парадигма сталого розвитку для прифронтових територій України, з необхідністю інтеграції оборонної складової до класичної триєдності сталого розвитку (економічної, соціальної, екологічної). Автори аналізують вплив тривалої війни на агроландшафти, землекористування та соціально-економічні процеси, обґрунтовуючи необхідність адаптації традиційних підходів до сучасних викликів. Запропоновано модель сталого розвитку, яка включає чотири взаємопов'язані складові: екологічну, економічну, соціальну та оборонну. Особливу увагу приділено класифікації територій за рівнем антропогенного навантаження та пріоритетному виділенню земель для оборонних потреб, консервації сільськогосподарських земель шляхом залуження багаторічними травами для запобігання деградації, проектуванню багатофункціональних лісосмуг, які поєднують полезахисні, екологічні та оборонні функції, а також реорганізації поселенської мережі з метою мінімізації цивільної присутності у прифронтових зонах. На прикладі Рябушанського лісу (Полтава) показано довгострокові наслідки бойових дій для екосистем та необхідність екологічної реабілітації. Порівняння з досвідом Ізраїлю та Швейцарії підкреслює унікальність українського контексту через масштаби фронту, різноманітність ландшафтів та історичну спадщину. Результати дослідження підтверджують, що відбудова прифронтових територій має ґрунтуватися на системному підході, який поєднує відновлення довкілля, соціально-економічну стабільність і національну безпеку. Запропоновані рішення спрямовані на створення стійкої інфраструктури, здатної протистояти як екологічним, так і військовим загрозам. *Ключові слова:* екологічна стійкість, оборонна стійкість, сталий розвиток, прифронтові території, агроландшафти, лісосмуги, рекультивація земель, консервація земель, військово-екологічна інтеграція.

Environmental and Military Resilience: A New Paradigm for Ukraine's Frontline Territories. Sharyi G., Kozlov V.

The article explores a new paradigm of sustainable development for Ukraine's frontline territories, emphasizing the necessity of integrating a defense component into the classical sustainability triad (economic, social, environmental). The authors analyze the impact of prolonged warfare on agro-landscapes, land use, and socio-economic processes, substantiating the need to adapt traditional approaches to contemporary challenges. A sustainable development model is proposed, incorporating four interrelated components: environmental, economic, social, and defense. Special attention is given to the classification of territories based on the level of anthropogenic pressure and the prioritization of land allocation for defense purposes, the conservation of agricultural lands through grassland restoration with perennial grasses to prevent degradation, the design of multifunctional shelterbelts combining protective, ecological, and defense functions, and the reorganization of settlement networks to minimize civilian presence in frontline areas. The case of the Ryabushan Forest (Poltava) illustrates the long-term consequences of combat on ecosystems and the need for ecological rehabilitation. A comparison with the experiences of Israel and Switzerland highlights the uniqueness of the Ukrainian context, given the scale of the front line, landscape diversity, and historical legacy. The findings confirm that the recovery of frontline territories must be based on a systemic approach that combines environmental restoration, socio-economic stability, and national security. The proposed solutions aim to create resilient infrastructure capable of withstanding both ecological and military threats. *Key words:* ecological resilience, defense resilience, sustainable development, frontline territories, agro-landscapes, shelterbelts, land reclamation, land conservation, military-environmental integration.

У сучасних реаліях відбувається глибока трансформація концепції сталого розвитку. З одного боку, війна як затяжний і всеохопний процес істотно впливає на всі сфери суспільного життя; з іншого – реалізація принципів сталого розвитку передбачає тривалість та стабільність, що в умовах воєнного стану виглядає вкрай ускладнено у даному дослідженні акцентовано увагу на необхідності адаптації та впровадження ідей сталого розвитку навіть у потенційно небезпечних та прифронтових районах.

Дослідженню принципів сталого розвитку та еколо-економічним аспектам організації землеко-

ристування, як чинника стійкості й ефективності сільськогосподарських підприємств присвячені праці О.М. Бородіної, А.О. Гуторова, А.Г. Мартіна, М.Г. Ступеня та інших.

Попри значний обсяг вітчизняних наукових досліджень у сфері землеустрою, сучасна геополітична ситуація вносить суттєві корективи. Сьогодні постає необхідність переосмислення планування сталого розвитку територій України із урахуванням мілітарних та оборонних потреб держави.

Аналіз еволюції методів управління та захисту територій демонструє значну динаміку, зумовлену

технологічним прогресом, політичними трансформаціями та соціокультурним контекстом. Від часів стародавніх цивілізацій до сучасних держав ключовим залишався принцип інтеграції природних і штучних бар'єрів, які поєднували оборонні, адміністративні та ідеологічні функції.

Сучасна епоха характеризується двома протилежними тенденціями: з одного боку – зростанням рівня технологізації (електронний моніторинг, розділові стіни, як, наприклад, в Ізраїлі), з іншого – екологізація та інтеграція посиленням екологічної свідомості (як у Швейцарії, де фортифікаційні споруди гармонійно вписуються в природний ландшафт) в умовах війни.

Україна стикається з низкою серйозних викликів у реалізації оборонних та стратегічних рішень, що робить її досвід унікальним.

По-перше – масштабність проблеми. На відміну від Ізраїлю (100 км фронту), Україна має значно більшу лінію оборони (1,2 тис. км), що ускладнює уніфікований підхід.

По-друге – історична спадщина. Територія України, що впродовж історії перебувала у складі різних державних утворень, включно з Радянським Союзом, має особливе геополітичне розташування. Сучасна лінія фронту ще тридцять років тому була внутрішнім кордоном у межах єдиної союзної держави, у той час загроза вважалася ймовірною із заходу, а не зі сходу.

По-третє – тривалість процесу та економічна ситуація. Згадані країни вибудовували свою оборонну інфраструктуру десятиліттями. Наприклад, реалізація швейцарської концепції «національного редути» розпочалася ще наприкінці XIX століття

[1]. Втілення неодноразово призупинялося, а підходи до оборонного будівництва змінювалися відповідно до технологічного розвитку. Після завершення Холодної війни чимало об'єктів було занедбано, нині ж здійснюються спроби їх повторної інтеграції в інфраструктуру. Таким чином, процес трансформації територій є динамічним, дороговартісним і довготривалим, особливо в умовах постійної загрози збройної агресії.

Традиційна концепція сталого розвитку передбачає три взаємопов'язані потреби: суспільні, екологічні та економічні [2]. Водночас запропонована нами новітня парадигма сталого розвитку вимагає включення ще й оборонної потреби (див. рис. 1).

На основі аналізу схеми, можна виокремити такі перехідні моменти до новітньої парадигми сталого розвитку, які відображено в пунктах 01–04:

1. **Пріоритет планетарного здоров'я (п.01)** свідчить про перехід від людоцентричного до холістичного підходу, в якому добробут людини пов'язаний із збереженням природних систем. У сучасній парадигмі сталого розвитку довкілля розглядається як основа стійкості соціальних та економічних процесів, а не лише як ресурс.

2. **Посилення кліматичної стійкості (п.02)** підкреслює необхідність інтеграції екологічної безпеки в системи національної та глобальної оборони. Це вказує на перехід до міжсекторального підходу, коли зміни клімату визнаються не лише екологічною, а й безпековою проблемою, здатною спричинити конфлікти через ресурси.

3. **Зв'язок між безпекою та економічним розвитком (п.03)** відображає зміщення парадигми до екологічно орієнтованих економік, де сталий розвиток



Рис. 1. Новітня парадигма сталого розвитку

неможливий без гарантій безпеки. Усе більше уваги приділяється зеленій економіці, що потребує стабільності для реалізації довгострокових стратегій [7].

4. Соціальна інклюзія як рушій добробуту (п.04) фіксує перехід до справедливого зростання, яке враховує потреби різних верств населення.

Елементи разом формують системний, міждисциплінарний підхід до сталого розвитку, який поєднує захист довкілля, безпеку, економічну стабільність та соціальну справедливість. Україна має враховувати оборонні потреби у своїй стратегії розвитку та визначати їх, як пріоритетні. Інші потреби сталого розвитку слід розглядати у тісному взаємозв'язку з досягненням оборонних цілей. Оборонна стійкість є невід'ємною умовою збереження державності.

Якщо застосовувати підхід на територіях, наближених до зон активних бойових дій (тобто в умовах фази активного ведення бойових дій), то практична реалізація має виглядати наступним чином. Території, які необхідно використовувати для оборонних цілей, слід класифікувати за ступенем антропогенного навантаження і розвитку: постійно задіяні для оборонних потреб із максимальним впливом; що перебувають під помірним впливом; потенційно можуть бути трансформовані для забезпечення оборонної стійкості.

Наприклад, на відстані 15 км від державного кордону може проходити перша укріплена лінія оборони у вигляді окопів, траншей, бетонних конструкцій, мінних полів та інших оборонних елементів, землі повинні мати відповідний правовий статус, оскільки зазвичай вони вилучаються з приватної власності. Найчастіше це були землі, на яких здійснювалася сільськогосподарська діяльність.

Для забезпечення оборонних потреб уздовж цієї лінії оборони відступають на 100 – 150 метрів в обидва боки. Якщо врахувати, що лінія оборони створюється у три ряди та має протяжність у сотні кілометрів, то площі, залучені під оборонні цілі, є значними і складають тисячі гектарів родючих земель, сільськогосподарського призначення, лісового та водного фонду, які необхідно перевести до земель оборони.

Щодо зони 100 – 150 метрів навколо основних ліній укріплень, то це у більшості землі, які були поспіхом покинуті й на яких припинено будь-яку господарську діяльність. Різка зупинка сільськогосподарської діяльності негативно впливає на всі сфери життєдіяльності. Фермери та сільськогосподарські виробники втрачають основний засіб виробництва, а рівень безробіття у регіоні зростає, що є особливо критичним на тлі активних бойових дій. Поля, на яких протягом десятиліть здійснювались агротехнічні заходи із внесенням гербіцидів та інших агрохімікатів, демонструють низьку здатність до самостійного відновлення природних фітоценозів.

Унаслідок припинення господарської діяльності запускається вторинна екзогенна сукцесія, що

супроводжується масовою інвазією бур'янів із високими адаптивними властивостями. Такий процес спричиняє деградацію агроєкосистем, що проявляється у самозалісенні, ерозійних процесах, підтопленнях, засміченні та інших несприятливих екологічних наслідках.

Рябушанський ліс, розташований у межах міста Полтава, є прикладом антропогенно трансформованої території. У 1940-х роках ХХ століття тут проходила лінія оборони, велися активні бойові дії. Упродовж понад 80 років на цій ділянці сформувався мікро- та мезорельєф, вкритий підлісковою рослинністю. Первинні геометричні форми значною мірою втрачено, однак природне відновлення території залишається неповним. Як видно на рисунку 2, рослинність у місцях колишніх оборонних споруд є значно біднішою порівняно із суміжними ділянками, де спостерігаються багаторічні дерева. Це свідчить про істотні відмінності в біологічних умовах.

Станом на літо 2025 року глибина оборонного рову залишається значною: висота бруствера становить 2,7 м, контрбруствера – 1,3 м, глибина ложа – 1,1 м, загальна протяжність оборонної лінії становить приблизно 250 метрів. Щодо вирв від авіаційних бомб, їхні діаметри коливаються від 2 до 7 метрів, а глибина – від 0,6 до 2 метрів. Рослинний покрив на ділянках бідний, подібний до того, що спостерігається на місцях оборонних споруд.

Рябушанський ліс, який функціонує як рекреаційна зона з мінімальним рівнем господарської діяльності, демонструє, що для повного відновлення земель, порушених унаслідок бойових дій, потрібні сотні років. Екосистема не здатна самостійно відновитися до первинного стану без зовнішньої екологічної реабілітації.

Близькість до житлової забудови спричинила додаткове антропогенне навантаження, зокрема використання заглиблень військового походження для несанкціонованого складування твердих побутових відходів.

Доцільним є проведення порівняння з Верденським лісом (Франція), територією зі схожими історичними передумовами формування. Наразі Верденський ліс має статус охоронюваної території та виконує важливу соціальну функцію як меморіальний комплекс, присвячений вшануванню загиблих у Першій світовій війні [3].

З огляду на вищезазначене, території, що зазнали бойових дій, можуть бути трансформовані у меморіальні комплекси з обмеженим або повністю забороненим веденням господарської діяльності. Запропоновано реалізувати фітомеліоративні та агроеліоративні заходи, зокрема консервацію земель шляхом залуження багаторічними травами.

Зазначені дії сприятимуть відновленню природних біоценозів, поліпшенню фізико-хімічного стану ґрунтів, активізації природних екосистемних проце-

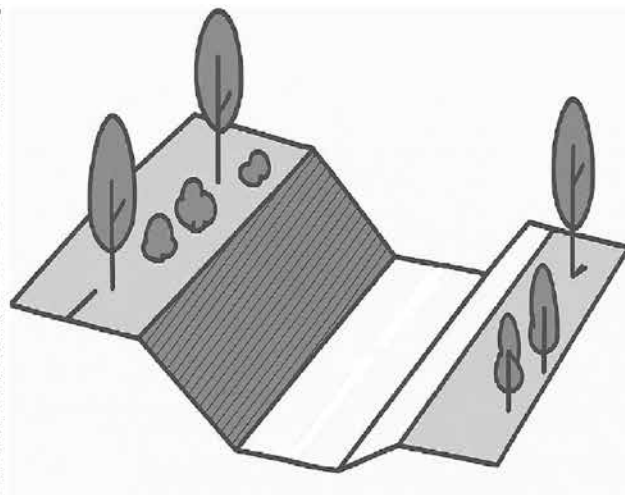
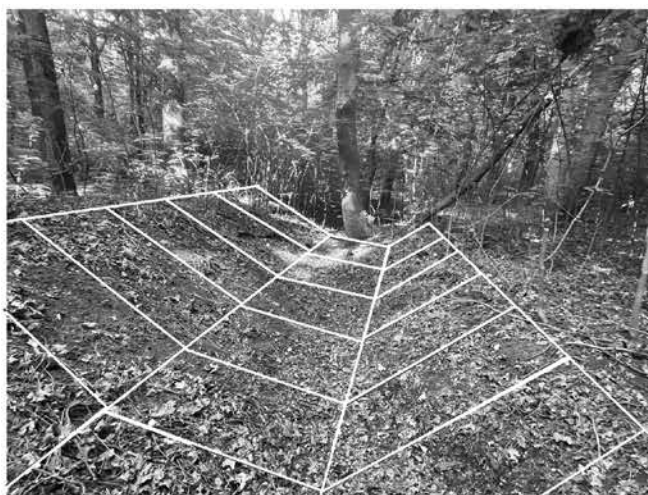


Рис. 2 Залишки оборонних споруд часів Другої Світової війни у Рябушанському лісі

сів, а також формуванню нових ареалів для популяцій диких тварин. Упровадження заходів забезпечуватиме інтеграцію зазначених територій у систему екологічних коридорів, підвищуючи не лише еколого-ландшафтний потенціал, але й оборонну стійкість регіонів.

Особливу увагу слід приділити створенню нових об'єктів природно-заповідного фонду. Необхідне проведення комплексу науково-дослідних робіт з оцінки екологічного потенціалу відповідних територій. Обмеження людської присутності та господарської діяльності стане ключовим чинником для ефективного функціонування охоронюваних природних об'єктів.

Необхідно також вирішити питання державної компенсації власникам та користувачам земельних ділянок. Доцільним є запровадження системи компенсацій за вилучення або націоналізацію земель, а також перегляд підходів до сільськогосподарського виробництва з акцентом на менш інтенсивні, екологічно доцільні форми господарювання. Серед перспективних напрямків: бджільництво, пасовищне тваринництво, екотуризм, розвиток локальних ініціатив за підтримки грантових програм.

Рациональне територіальне планування у межах зон бойових дій дозволить досягти таких цілей, як підвищення оборонної стійкості територій, консервація вилучених земель, екологічне відновлення до природного стану, використання земель для органічного землеробства, виконання соціальної функції у вигляді меморіальних комплексів, а також забезпечення сталого соціально-економічного розвитку регіонів.

Наступним важливим етапом є організація лісосмуг. Більшість лісосмуг сьогодні перебуває у занедбаному стані через безконтрольну вирубку, хаотичне заростання, ураження дерев хворобами та відсутність належного догляду, а в прифронтових регіонах – ще й через пошкодження внаслідок бойо-

вих дій, що суттєво знизило їхню лісомеліоративну ефективність.

У прифронтових регіонах лісосмуги частково знищені, оскільки використовуються як для оборонних, так і для наступальних дій [5]. Але час активної вегетації, завдяки густій зеленій масі, вони забезпечують природне маскування та укриття. Дані переваги можуть бути використані і ворогом.

У зв'язку з частковим знищенням лісосмуг і лісових масивів раціональним рішенням буде не відновлення старих насаджень на попередніх місцях, а проектування нової системи лісових насаджень із багатофункціональним призначенням, враховуючи не тільки лісомеліоративну, а і оборонну стійкість.

Сучасні лісосмуги повинні виконувати кілька ключових завдань:

- ползахисна функція – протидія панівним вітрам, збереження родючості ґрунтів, волого накопичення та мікрокліматичні поліпшення [4];
- створення екологічних коридорів – об'єднання лісосмуг у єдину мережу для вільного пересування диких тварин і збереження біорізноманіття;
- оборонна функція – проектування лісосмуг має враховувати аспекти військової безпеки: насадження повинні ускладнювати дії противника під час наступу чи диверсійно-розвідувальних операцій, одночасно сприяючи успішній обороні.

Створення нової системи лісосмуг має стати важливою складовою екологічної відбудови та зміцнення національної безпеки.

Найбільш болючим питанням залишається організація поселенської мережі. Вздовж прифронтової та прикордонної лінії з агресором розташовані сотні населених пунктів, у яких проживають десятки тисяч людей. Громади першими страждають від збройної агресії.

В рамках нової парадигми сталого розвитку необхідно мінімізувати присутність цивільного населення у прифронтових регіонах. Поселенську

мережу слід перемістити вглиб території, створюючи більш безпечні умови для проживання. На місці зруйнованих або вразливих населених пунктів має бути проведена повна рекультивация земель із поверненням територій до природного стану [6].

Окремі поселення можуть бути перепрофільовані в прикордонні застави, виконуючи функції охорони та моніторингу державного кордону, для указаних цілей можна вивчати і впроваджувати досвід поселень Ізраїлю (кібуц).

Висновки

Проведене дослідження підкреслює необхідність переосмислення традиційних принципів сталого розвитку в умовах воєнних викликів, з якими стикається Україна. Подальші дослідження мають зосередитися на інтеграції екологічних, сільськогосподарських та оборонних цілей, а також на аналізі міжнародного досвіду.

Результати роботи демонструють, що існуючі агроландшафтні структури, зокрема лісосмуги та поселення, зазнали критичних руйнувань і більше не здатні ефективно виконувати свої первісні функції. Лісосмуги, які спочатку створювалися для протидії ерозії та накопичення вологи, тепер потребують реорганізації не лише з екологічною, а й з оборонною метою. Аналогічно, поселенську мережу необхідно реконструювати: цивільне населення має бути переміщене за межі прифронтових зон, а землі поселень – або відновлені до природного стану, або трансформовані в прикордонні застави чи військові поселення.

Приклад Рябушанського лісу яскраво ілюструє довгострокові наслідки бойових дій для екосистем. Незважаючи на те, що з моменту активних бойових дій минуло понад 80 років, територія лісу досі демонструє значні антропогенні зміни: залишки оборонних споруд, бідний рослинний покрив у місцях колишніх укріплень та вирви від бомб. Це свідчить про те, що природне відновлення таких територій без спеціальних реабілітаційних заходів є надзвичайно повільним. Досвід Рябушанського лісу підтверджує необхідність активних екологічних заходів, таких як фітомеліорація та консервація земель, для прискорення відновлення порушених екосистем. Крім того, цей випадок підкреслює важливість трансформації подібних територій у меморіальні комплекси або об'єкти природно-заповідного фонду, що поєднує соціальні, екологічні та історичні функції.

У ширшому контексті це свідчить про те, що сталий розвиток у військових умовах має поєднувати відновлення довкілля, забезпечення соціально-економічної стабільності та гарантування національної безпеки. Відбудова має виходити за межі простого відновлення зруйнованої інфраструктури та передбачати стратегічне перепланування територій із цілком на довгострокову стійкість.

У підсумку створення нової парадигми сталого розвитку для прифронтових регіонів слід розглядати не лише як вимушений крок, а й як можливість для стратегічного, стійкого та перспективного планування розвитку територій.

Література

1. Мудрієвська І. І. Формування та зміна парадигми розвитку історичної пам'яті про Другу світову війну у Швейцарії (частина перша). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Історичні науки*. 2023. Т. 34, № 2. С. 184–194.
2. Програма розвитку ООН. Цілі сталого розвитку. URL: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (дата звернення: 28.06.2025).
3. Forêt de Verdun. *Tourisme Verdun*: веб-сайт. URL: <https://www.tourisme-verdun.com/destination-nature> (дата звернення: 28.06.2025).
4. Екологія агросфери: підручник / О. І. Фурдичко та ін. Київ: ДІА, 2022. 584 с.
5. Завдані збитки. ПЗФ. *ЕкоЗагроза*: веб-сайт. URL: <https://ecozagroza.gov.ua/damage/pzf> (дата звернення: 28.06.2025).
6. Черноусова Т. Необхідність відновлення порушених територій в сучасних містах. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. Vol. 4, № 2. Р. 13–25. DOI: 10.46299/j.isjea.20250402.02.
7. Національна доповідь «Цілі сталого розвитку: Україна» / Кабінет Міністрів України. 2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (дата звернення: 02.07.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ДИНАМІКУ ПРИРОДНИХ БІОТОПІВ У ГЕОСИСТЕМІ РІЧКИ ПІВДЕННИЙ БУГ

Нікітіна О.В., Лемешко В.В.

Уманський національний університет

вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань

ooooolga@ukr.net

У статті здійснено комплексний аналіз впливу кліматичних змін на трансформаційні процеси природних біотопів у межах геосистеми річки Південний Буг, із фокусом на території Кіровоградської області. Протягом останніх трьох десятиліть регіон зазнав істотних кліматичних зрушень, які виражаються у зростанні середньорічних температур, зменшенні обсягів весняно-літніх опадів, підвищенні кількості днів із високими температурними екстремумами, а також у збільшенні тривалості бездошових періодів в активну фазу вегетації. Ці зміни призвели до глибоких порушень гідротермічного режиму, зниження рівня зволоження ґрунтів, скорочення запасів ґрунтових вод і, як наслідок, – деградації вологих і прибережно-водних біотопів, таких як болота, заплавні луки, низинні заболочені ділянки. Дослідження ґрунтується на результатах маршрутних обстежень, проведених у 2022–2023 роках, методах фітоіндикації та аналізі змін флористичної структури у порівнянні з матеріалами 1990-х років. Особливу увагу приділено зміні фітоценотичної структури: встановлено значне скорочення площ із гігрофільною рослинністю, зокрема видів *Carex acutiformis*, *Juncus articulatus*, які все частіше заміщуються ксерофітними та мезофітними асоціаціями за участі *Festuca valesiaca*, *Stipa capillata*, а також поширенням адвентивних і рудеральних видів. Така динаміка вказує на поступову втрату біотично стабільних станів, зниження екосистемної резистентності та порушення процесів саморегуляції. Просторовий аналіз, проведений без застосування ГІС-технологій – виключно на основі натурних спостережень і фітоіндикаційних методів, – дозволив виявити найбільш уразливі зони в межах басейну Південного Бугу: долину річки Синюха, деградовані надзаплавні тераси поблизу смт Новоархангельськ, балки з інтенсивним сільськогосподарським навантаженням. З огляду на це, дослідження має високу наукову новизну, адже демонструє можливість локалізації критичних осередків біотопної деградації без застосування складних цифрових технологій. Практична значущість полягає в тому, що отримані результати можуть бути використані при розробленні регіональних адаптаційних стратегій до змін клімату, плануванні природоохоронних заходів, управлінні біотопною вразливістю, а також у вдосконаленні системи екологічного моніторингу в межах річкових басейнів центральної України. **Ключові слова:** біотопи, кліматичні зміни, деградація, регіональні трансформації, адаптація.

The impact of climate change on the dynamics of natural biotopes in the geosystem of the Southern Bug river. Nikitina O., Lemeshko V.

The article presents a comprehensive analysis of the impact of climate change on the transformation processes of natural biotopes within the geosystem of the Southern Bug River, with a particular focus on the territory of the Kirovohrad region of Ukraine. Over the past three decades, the region has experienced significant climatic shifts, including an increase in average annual temperatures, a reduction in spring-summer precipitation, more frequent high-temperature extremes, and a longer duration of rainless periods during the vegetation season. These climatic transformations have caused profound disturbances in the hydrothermal regime, reduced soil moisture levels, decreased groundwater reserves, and consequently, led to the degradation of wetland and riparian biotopes, such as swamps, floodplain meadows, and lowland marshes. The study is based on results from field route surveys conducted in 2022–2023, phytindication methods, and an analysis of changes in floristic structure compared to data from the 1990s. Particular attention is paid to shifts in phytocoenotic composition: a significant reduction in the area of hygrophilous vegetation has been observed, particularly of species such as *Carex acutiformis* and *Juncus articulatus*, which are increasingly being replaced by xerophytic and mesophytic associations dominated by *Festuca valesiaca* and *Stipa capillata*, along with a growing presence of adventive and ruderal plant species. This dynamic indicates a gradual loss of biotic stability, reduced ecosystem resilience, and disrupted self-regulation processes. Spatial analysis, conducted without the use of GIS technologies – relying solely on field observations and phytindication methods – allowed for the identification of the most vulnerable areas within the Southern Bug basin. These include the Syniukha River valley, degraded floodplain terraces near the urban-type settlement of Novoarkhanhelsk, and gully systems subjected to intense agricultural pressure. The scientific novelty of the research lies in the localization of critical zones of ecosystem transformation without digital mapping tools, relying exclusively on empirical data and indicator vegetation analysis. The practical significance of this study is reflected in the potential application of its findings for the development of regional adaptation strategies to climate change, ecological planning, biotope vulnerability management, and improvement of environmental monitoring systems within river basins in central Ukraine. **Key words:** biotopes, climate change, degradation, regional transformations, adaptation.

Постановка проблеми. Кліматичні зміни, спричинені як природними факторами, так і інтенсивною антропогенною діяльністю, трансформують струк-

туру геосистем у всьому світі. В Україні ці процеси особливо помітні в басейнах великих річок, таких як Південний Буг. За даними Українського гідро-

метеорологічного центру (2022), у межах басейну спостерігається підвищення середньорічної температури на 1,8 °C за останні 30 років та зменшення опадів у весняно-літній період [1, 2]. Це призводить до деградації вологих біотопів, втрати природного різноманіття та зміни структури фітоценозів [3, 4].

Кліматичні зміни – один із ключових факторів трансформації природних геосистем. У межах басейну річки Південний Буг, зокрема в Кіровоградській області, протягом останніх десятиліть спостерігається поступове підвищення температури повітря та зменшення кількості атмосферних опадів у період активної вегетації, що призводить до деградації вологих біотопів, зниження видового різноманіття та структурної перебудови фітоценозів.

Актуальність дослідження. Басейн річки Південний Буг охоплює широкий спектр біотопів, зокрема заплавні луки, болота, дубові та грабові ліси, які забезпечують важливі екосистемні функції. Згідно з дослідженнями Білоусова та співавторів [5], зміна клімату сприяє посиленню ксерофітизації угруповань, зменшенню зволоження ґрунтів та зникненню рідкісних видів. Своєчасне вивчення цих процесів дозволяє виробити адаптаційні стратегії та мінімізувати екологічні ризики.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. На відміну від багатьох попередніх праць, що базуються переважно на супутникових знімках та ГІС-моделюванні, у даному дослідженні застосовано фітоіндикаційний підхід, що дозволяє безпосередньо фіксувати флористичні зрушення та структуру угруповань у реальних біотопах Кіровоградської області. Це забезпечило поглиблений аналіз стану вологих, лучних, степових та агроландшафтних екосистем у межах геосистеми річки Південний Буг.

Результати дослідження мають практичну значущість для розробки заходів адаптації до зміни клімату на регіональному рівні, зокрема у рамках реалізації кліматичної політики України, національних стратегій збереження біорізноманіття та планування охоронних заходів у басейнових геосистемах.

Мета дослідження. Оцінити зміни структури та екологічного стану природних біотопів у межах Кіровоградської частини басейну Південного Бугу під впливом сучасних кліматичних змін на основі наземних обстежень та фітоіндикаційного аналізу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема впливу кліматичних змін на біорізноманіття та структуру природних біотопів є предметом широкого наукового обговорення як у світовій, так і в українській літературі. У звітах Міжурядової групи експертів зі зміни клімату [6] наголошується, що зростання середньої глобальної температури та зміна гідрокліматичних режимів уже призвели до суттєвого скорочення площ природних біотопів, особливо в прибережних зонах і в долинах річок. Структурні зміни у фітоценозах спостерігаються

переважно через порушення гідрологічного режиму, зміщення сезонів вегетації та підвищення частоти кліматичних екстремумів (засухи, паводки) [7].

Зростаюча кількість європейських досліджень [8, 9] підтверджує втрату біотопної мозаїчності внаслідок кліматично обумовленої аридизації, що особливо загострюється в регіонах із високим антропогенним навантаженням. Водночас, більшість таких праць акцентують на макрорегіональному рівні (рівень біомів, екорегіонів), залишаючи поза увагою локальні, дрібномасштабні трансформації, які є вирішальними для збереження рідкісних та ендемічних угруповань.

В Україні питання взаємозв'язку кліматичних змін із трансформацією природного середовища досліджуються переважно у контексті агрокліматичних зон, лісостепу та степу [10, 11].

Деякі вчені зробили спробу поєднати кліматичні параметри зі змінами у структурі лісових угруповань, виявивши закономірності скорочення чисельності мезофільних видів на користь більш стійких до засухи видів [3, 4]. Однак ці дослідження мають загальний характер і не деталізують просторових аспектів.

Існує небезпека втрати рідкісних вологолюбних видів у заплавах Південного Бугу внаслідок зміни режиму зволоження [5, 12]. Водночас, бракує комплексних досліджень, що інтегрують геоінформаційний аналіз, довготривалі кліматичні ряди, польові спостереження та екологічне моделювання для визначення вразливості біотопів до кліматичних аномалій.

Таким чином, хоча загальні тенденції трансформації біотопів під впливом кліматичних змін окреслені, локальні аспекти (наприклад, у межах басейну Південного Бугу) залишаються вкрай недостатньо дослідженими. Особливо це стосується таких складових, як: структурна динаміка фітоценозів, втрата екосистемних функцій, просторово-часова вразливість біотопів та роль ландшафтної структури у буферизації кліматичних впливів. Саме цим питанням і присвячено дане дослідження.

Невирішені частини загальної проблеми. Незважаючи на зростаючу кількість досліджень, недостатньо охопленими залишаються питання локальної динаміки окремих біотопів, їх структурної перебудови під впливом зміни кліматичних параметрів, ролі мікроклімату, а також просторової вразливості до деградації. Дана стаття присвячена саме аналізу цих малодосліджених аспектів.

Новизна. У межах дослідження вперше проведено комплексну оцінку трансформацій біотопів у басейні річки Південний Буг на прикладі Кіровоградської області, із застосуванням фітоіндикаційного підходу, ретроспективного картографічного аналізу та натурних польових досліджень без використання ГІС-технологій.

Наукова новизна полягає також у локалізації осередків підвищеної екологічної вразливості,

визначених за ознаками флористичного спрощення, гідрологічного виснаження ґрунтів та інвазії бур'янових видів. Це дозволило здійснити кількісну і якісну діагностику стійкості біотопів до кліматичних аномалій на рівні окремих ділянок, що раніше не було предметом детального дослідження в межах регіону.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження поглиблює уявлення про взаємозв'язок кліматичних трендів і структури біотопів у межах великих річкових геосистем. Одержані результати мають значення для біогеографії, ландшафтно-екології, природокористування, адаптаційного планування та кліматичної політики.

Викладення основного матеріалу. Дані метеоспостережень свідчать про поступове зростання середньорічної температури на $+1,6^{\circ}\text{C}$ за останні три десятиліття, що супроводжується зменшенням кількості опадів у весняно-літній період у середньому на 17–22%. Збільшення тривалості посушливих інтервалів до 20–30 днів вегетаційного періоду спричиняє дефіцит вологи у ґрунті, що є вирішальним для динаміки мезофільних та гігрофільних угруповань [2].

Ці тенденції узгоджуються з висновками Білоусова та співавторів [5], які зазначали кліматичну зумовленість деградації вологих біотопів Південного Бугу. Наші результати доповнюють попередні дослідження локальними параметрами тривалості посух та вегетаційних зсувів, що мають прямий вплив на видовий склад і продуктивність фітоценозів.

Аналіз літературних джерел дає змогу встановити чітку тенденцію до ксерофітизації:

Це проявляється у зменшенні заплавних луки; появі псевдостепових та агро-рудеральних угруповань на колишніх вологих землях.

Ці процеси підтверджують гіпотезу Клименка [10] про деградацію лучних біотопів у зв'язку зі зменшенням зволоження та заміщенням мезофітів ксеромезофітами.

Наше дослідження уточнює, що ксерофітизація є не лише результатом кліматичних змін, а й наслідком порушення водного режиму через агротехнічне втручання (осушення, зрошення).

Сумарне зменшення площ боліт, заболочених та заплавних луків у межах досліджуваної території сягає понад 34%, що є критичним показником деградації водозалежних екосистем (табл. 1). Основними причинами є зниження паводкової активності річок (зокрема Південного Бугу та його приток – Синюхи, Великої Висі); зменшення ґрунтового зволоження через дефіцит весняно-літніх опадів; вплив меліоративних заходів у минулому, зокрема осушення в низинних частинах долин.

Такі втрати особливо небезпечні через втрату місць існування гігрофільних видів і погіршення водорегуляторної функції ландшафтів.

Незначне скорочення байрачних лісів (–7,4%) пов'язане передусім не з кліматом, а з розорюванням схилів або викорчовуванням у межах агроосвоєння. Завдяки своїй топографічній захищеності (у балках, на схилах з підвищеною вологістю) байрачні ліси зберегли певну стійкість до посушливих трендів.

Збільшення площі степових угруповань на 23,6% свідчить про розширення ареалів ксерофільної рослинності. Це не означає відновлення природного степу, а свідчить про деградацію лучної та заплавної рослинності та наступ ксерофітних видів на місця колишніх вологих або дернових біоценозів.

Такі трансформації ілюструють і дані інших дослідників, де аридизація розглядається як ключова загроза для лісостепових екосистем у Центральній Європі [9].

Зростання площ агроландшафтів з елементами степу а 18,8% свідчить про: зниження продуктивності культур у зонах ризикованого землеробства, що є проявом антропогенної трансформації.

Цей тип трансформацій виконує роль буфера між природними та повністю антропогенізованими ландшафтами, однак не компенсує втрат вологих біотопів.

Таблиця 1

Динаміка площ основних типів біотопів у межах Кіровоградської частини басейну річки Південний Буг у 1990–2023 рр

Тип біотопу	Площа, тис. га (1990)	Площа, тис. га (2023)	Зміна, %	Коментар
Болота та заболочені луки	6,2	4,0	–35,5%	Скорочення водонасичених екотопів
Заплавні луки	11,8	7,7	–34,7%	Осушення та зміна гідрологічного режиму
Байрачні ліси	5,4	5,0	–7,4%	Незначні втрати через обмежену площу
Степові угруповання	12,3	15,2	+23,6%	Активізація процесів ксерофітизації
Агроландшафти з елементами степу	18,1	21,5	+18,8%	Розширення посушливих угруповань

Висновки. На основі проведеного дослідження встановлено, що кліматичні зміни є визначальним фактором трансформації природних біотопів у межах Кіровоградської частини басейну річки Південний Буг. Спостерігається чітка тенденція до аридизації, зумовлена підвищенням середньорічної температури та зменшенням кількості опадів у період активної вегетації, що зумовлює зниження зволоження ґрунтів і порушення гідрологічного режиму. Це призводить до істотного скорочення площ вологолюбних біотопів – зокрема, боліт, заболочених та заплавних луків, сумарне зменшення яких перевищує 34%.

У рослинному покриві зафіксовано зниження середнього індексу вологолюбності угруповань, зменшення флористичного багатства, зростання частки адвентивних видів, що є ознаками загального флористичного спрощення та екосистемної деградації. Водночас виявлено просторову нерівномірність вразливості біотопів: найбільших трансформацій зазнають балки, нижні тераси та прибережні ділянки, де відбувається активне

заміщення гігрофільної рослинності ксерофітними видами.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають важливе наукове та прикладне значення. Вони не лише деталізують загальні тенденції, описані у попередніх регіональних дослідженнях, але й доповнюють їх просторовим аналізом, фітоіндикаційними оцінками та кількісними показниками деградації. Практична цінність роботи полягає у можливості використання отриманих даних при формуванні регіональних планів адаптації до змін клімату, визначенні пріоритетних територій для екосистемної реставрації, розробці стратегій сталого природокористування в умовах кліматичної нестабільності.

Дослідження також може бути основою для вдосконалення системи екологічного моніторингу, зокрема в частині оцінки вразливості ландшафтів до кліматичних аномалій. Важливою перспективою є застосування результатів у природоохоронному плануванні та оцінці ефективності адаптаційних заходів на локальному рівні.

Література

1. S. Snizhko ^{a, b}, I. Didovets ^c, A. Bronstert ^a Ukraine's water security under pressure: Climate change and wartime Author links open overlay panel. *Water Security*. 2024. Volume 23. С 100–182
2. Український гідрометеорологічний центр (УкрГМЦ). *Кліматичний паспорт Кіровоградської області. (1991–2023)*. 2023. Київ.
3. Андрущенко С. В. Просторово-часова динаміка біотопів басейну Південного Бугу в умовах зміни клімату. *Вісник географічного товариства України*. 2023. № 2. С. 45–53.
4. Левченко І. М. Вплив кліматичних змін на трансформацію фітоценозів у лісостепових геосистемах України. *Наукові записки Національного університету «Острозька академія». Серія: Природничі науки*. 2021. № 21. С. 112–120.
5. Білоусов В. П., Савчук О. Л., Гордієнко Л. С. Ксерофітизація заплавних угруповань басейну Південного Бугу як результат кліматичних змін. *Наукові праці ЧНУ імені Петра Могили*. 2020. 326(314), С. 41–47.
6. IPCC. *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. Cambridge University Press.
7. Wang, Y., Chen, X., Zhang, L. Impact of Climate Change on Vegetation Structure and Distribution in Riverine Ecosystems. *Journal of Environmental Sciences*. 2020. 95. С. 182–195. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.03.015>
8. Biodiversity and climate change in Europe. – Luxembourg: European Environment Agency, 2020. 36 p.
9. Fischer, J., Abson, D. J., Butsic, J. Transformative change for biodiversity and livelihoods: A call for ecological resilience and social equity. *Conservation Biology*, 2019. 33(6). С. 1177–1180. <https://doi.org/10.1111/cobi.13376>.
10. Клименко О. В. Зміни лучної рослинності Подільської височини в умовах сучасного клімату. *Вісник географічного товариства України*. 2022. 2(101). 38–45.
11. Іваненко С. М. Гідрологічні особливості середньої течії річки Південний Буг: динаміка та екологічні наслідки. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2020. 4. С. 17–24.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ПРОСТОРОВА ОЦІНКА ВРАЗЛИВОСТІ ДЕРГАЧІВСЬКОЇ ГРОМАДИ ДО ЕКСТРЕМАЛЬНИХ ТЕМПЕРАТУР І ПОСУХ В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ

Хандогіна О.В., Дядін Д.В., Дрозд О.М.

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

вул. Чорноглазівська, 17, 61002, Харків

olga.khandogina@kname.edu.ua, dmytro.diadin@kname.edu.ua, Olena.Drozd@kname.edu.ua

У статті представлені результати просторового аналізу кліматичної вразливості Дергачівської міської територіальної громади Харківської області до екстремальних температур і посушливих умов, зумовлених зміною клімату. Громада розташована у північній частині Харківської агломерації та характеризується поєднанням сільських і приміських ландшафтів, значною часткою сільськогосподарських угідь та лісів. Зважаючи на розташування в зоні активних бойових дій, територія громади зазнає додаткового антропогенного навантаження, що ускладнює адаптацію до зміни клімату. Для дослідження застосовано відкриті супутникові дані Sentinel-2, цифрову модель рельєфу SRTM та глобальний продукт земного покриття ESA WorldCover 2021. Виконано просторовий аналіз змін індексу вологості між липнем та серпнем 2024 року, на основі чого визначено ділянки зі зниженням вологозабезпечення. Додатково побудовано класифіковану карту експозиції схилів, що дозволяє враховувати мікрокліматичні умови території. На основі даних про типи землекористування визначено найменш екологічно стійкі (найбільш уразливі) категорії земель (сільськогосподарські угіддя, оголені поверхні, трав'яниста рослинність). У результаті проведеної перекласифікації трьох ключових просторових шарів (землекористування, експозиція, зміни вологості) розроблено підхід до оцінки комплексного індексу вразливості території. Отримані результати дозволили визначити пріоритетні зони для впровадження адаптаційних заходів, спрямованих на зменшення ризиків деградації земель і втрати продуктивності агроєкосистем. Запропоновану методiku може бути адаптовано до інших територіальних громад України, зокрема в умовах обмеженої доступності польових досліджень та потреби в оперативному екологічному моніторингу. Дослідження сприяє реалізації завдань різних видів екологічних оцінок, зокрема стратегічної екологічної оцінки, в контексті розробки інструментів для екологічного планування та оцінки впливу змін клімату, що є важливою складовою для адаптації територій до кліматичних ризиків та зменшення їх вразливості. *Ключові слова:* просторовий аналіз, моделювання, зміна клімату, екологічні оцінки, територіальна громада, сталий розвиток, екологічна стійкість, індекс вразливості

Spatial Assessment of the Vulnerability of the Derhachi Community to Extreme Temperatures and Drought under Climate Change Conditions. Khandogina O., Diadin D., Drozd O.

The article presents the results of a spatial analysis of the climate vulnerability of the Derhachi Urban Territorial Community in Kharkiv Oblast to extreme temperatures and drought conditions driven by climate change. The community is located in the northern part of the Kharkiv agglomeration and is characterized by a mix of rural and peri-urban landscapes, with a significant share of agricultural land and forests. Due to its location in an area of active military operations, the territory experiences additional anthropogenic pressure, which complicates climate adaptation. The study utilizes open-access satellite data from Sentinel-2, the SRTM digital elevation model, and the ESA WorldCover 2021 global land cover product. A spatial analysis of changes in the moisture index between July and August 2024 was conducted to identify areas with declining moisture availability. Additionally, a classified slope aspect map was developed to account for the territory's microclimatic conditions. Based on land use data, the least environmentally resilient (most vulnerable) land categories were identified, including agricultural land, bare surfaces, and herbaceous vegetation. As a result of the reclassification of three key spatial layers (land use, slope aspect, and moisture change), an approach was developed for assessing a composite vulnerability index of the territory. The obtained results allowed the identification of priority zones for implementing adaptation measures aimed at reducing the risks of land degradation and agroecosystem productivity loss. The proposed methodology can be adapted to other territorial communities in Ukraine, particularly under conditions of limited access to field surveys and the need for rapid environmental monitoring. The study supports the implementation of various types of environmental assessments, including Strategic Environmental Assessment, in the context of developing tools for environmental planning and assessing the impacts of climate change – a crucial component for adapting territories to climate risks and reducing their vulnerability. *Key words:* spatial analysis, modelling, climate change, environmental assessments, territorial community, sustainable development, environmental resilience, vulnerability index.

Постановка проблеми. Зміна клімату є одним з ключових викликів для сталого розвитку територій, особливо в умовах зростання частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ. За даними Шостого оціночного звіту Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) [1], у Східній Європі очікується посилення середньорічних температур, зменшення кількості атмосферних опадів у літній період та зростання тривалості періодів без

дощу. Ці зміни мають значний вплив на сільське господарство, стан довкілля, здоров'я населення та інфраструктуру, особливо в невеликих громадах з обмеженими адаптаційними можливостями.

У національному контексті зміна клімату для України вже призводить до відчутних наслідків. За спостереженнями, середня річна температура повітря в країні зросла на 1,2–1,6 °C у порівнянні з кліматичною нормою другої половини XX століття,

а в літні періоди значно частіше фіксуються дні з температурою понад +30 °С [2]. Східні області України, включно з Харківською, належать до регіонів, найбільш уразливих до посух, зростання температури поверхні ґрунту та дефіциту вологи влітку [3]. Зміни у режимі атмосферних опадів та посилення теплового навантаження можуть мати серйозні наслідки для водного балансу, якості ґрунтів і стану екосистем у цих регіонах.

Зміна клімату призводить до зростання ризиків для соціально-економічних систем і екосистем на локальному рівні. Для впровадження належної адаптації та підвищення стійкості громад до означених кліматичних загроз, МГЕЗК [1], GIZ [4] та інші провідні експерти рекомендують проводити оцінку ризиків і вразливості територій до зміни клімату, метою якої є визначення найбільш вразливих секторів (об'єктів). Така оцінка є важливою складовою стратегій сталого розвитку територій, стратегічної екологічної оцінки (CEO), оцінки впливу на довкілля (ОВД) та інших видів екологічних оцінок у документах державного планування різного рівня, оскільки є основою для ефективної пріоритезації та впровадження заходів з адаптації.

Актуальність дослідження. Дергачівська міська територіальна громада, розташована в Харківській області, є типовим прикладом малих міських і сільських територій, що стикаються з комбінованим впливом зміни клімату, урбанізаційного тиску та наслідків війни. У зв'язку з цим актуальним є визначення зон, які найбільш чутливі до перегріву, втрати вологи, зниження екологічного комфорту та ризику деградації довкілля.

Як і багато інших громад України, Дергачівська громада є підписантом Угоди мерів, у рамках якої громади беруть на себе зобов'язання зменшення викидів парникових газів та досягнення кліматичної нейтральності. Обов'язковою частиною Плану дій енергетичного сталого розвитку і клімату, який розробляють і впроваджують підписанти, є проведення оцінки ризиків і вразливості до зміни клімату. Рекомендації Угоди мерів пропонують оцінювати ризики і вразливість на основі двох підходів – індикаторного та просторового, які передбачають, відповідно, оцінювання кількісних індикаторів вразливості та проведення просторового аналізу з виділенням зон найбільшої вразливості [5].

Рамкові підходи та методологічні засади проведення оцінки ризиків і вразливості визначені в оціночних звітах МГЕЗК, настановах провідних експертних груп, та адаптовані на національному рівні в методичних рекомендаціях Міндовкілля України [6]. Проте, методична підтримка та апробація оцінки на локальному рівні для територіальних громад досі має певні прогалини [7].

Вразливість територій до кліматичних екстремумів значною мірою залежить від просторових характеристик середовища – типу землекористу-

вання, щільності забудови, наявності зелених зон, водних об'єктів, рельєфу, експозиції схилів тощо. Просторовий аналіз цих чинників дозволяє виявити зони потенційно підвищеної кліматичної вразливості та сформулювати практичні рекомендації для адаптації. У цьому контексті важливим є комплексне оцінювання як природних, так і антропогенних детермінант вразливості з використанням геоінформаційних технологій.

Метою дослідження є просторове оцінювання вразливості території Дергачівської громади до екстремальних температур і посух в умовах зміни клімату на основі багатокритеріального аналізу геопросторових даних. У роботі застосовано відкриті супутникові дані, методи просторової класифікації та картографування, що дозволяють обґрунтувати пріоритетні зони для заходів адаптації та планування зеленої інфраструктури.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження спрямоване на вирішення актуального наукового та прикладного завдання – просторової оцінки вразливості територій до кліматичних стресів на локальному рівні. Робота сприяє реалізації ключових положень державно-кліматичної політики, сталого розвитку (Ціль 13 – Боротьба зі зміною клімату), кліматичної стійкості та розробки інструментів місцевої політики з урахуванням екологічної безпеки, що безпосередньо відповідає завданням Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року [8] та Закону України «Про основні засади державної кліматичної політики» [9].

Запропонований підхід, що базується на використанні відкритих супутникових даних, геоінформаційних технологій і просторового аналізу, дозволяє оперативні і масштабовано оцінювати рівень уразливості різних ландшафтних компонентів. Це створює наукову основу для прийняття практичних рішень щодо зонування території, управління земельними ресурсами, протидії деградації довкілля та планування адаптаційних заходів у громадах, що зазнали воєнного та кліматичного навантаження. Результати оцінки вразливості соціально-економічних секторів громади, проведеної за запропонованою методикою, можуть бути враховані в документах державного планування, які розробляються громадою, а також під час здійснення CEO та ОВД відповідно до рекомендацій Міндовкілля України [10].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оцінка кліматичної вразливості територій дедалі частіше здійснюється за допомогою інтегральних індексів, що поєднують показники перебування під дією, чутливості та адаптивної спроможності. Численні дослідження науковців присвячені питанням розробки індексів вразливості для різних територій з залученням різних просторових та непросторових параметрів. У просторових оцінках часто

пропонуються індекси вразливості, що характеризують окремі кліматичні загрози, зокрема спеку [11]. Оскільки вразливість територій є величиною багатфакторною, успішною практикою є застосування підходів багатокритеріальної просторової оцінки [12, 13], яка враховує просторовий розподіл даних землекористування, транспорту, забруднення повітря, зелених зон, соціально-економічні, гідрологічні показники, тощо. Ці дослідження підтверджують ефективність комплексного просторового аналізу для визначення кліматично вразливих територій і формування адаптаційної політики [14].

На території України досвід просторової оцінки впливу кліматичних загроз та вразливості в основному базується на аналізі ландшафтних зон або їх компонентів у регіональному або національному масштабах [15]. Завдяки доступності даних регіональних кліматичних моделей, наразі проводяться оцінки кліматичних впливів на рівні областей у рамках розробки стратегій адаптації соціально-економічних секторів до зміни клімату [16]. Разом з тим, досвід оцінки вразливості територій громад та населених пунктів, як правило, зосереджений лише на індикаторному підході, без кількісного оцінювання просторової мінливості індикаторів вразливості [17, 18].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри зростаючу увагу до проблем кліматичної вразливості територій, більшість досліджень залишають поза увагою особливості локальних територіальних громад. Недостатньо опрацьованими залишаються питання інтегрованої оцінки просторової вразливості громад до впливу екстремальних температур та літньої аридизації, зокрема на основі відкритих супутникових даних і адаптованих під місцевий контекст методик. Особливо актуальним залишається вивчення змін стану ландшафтних систем за впливу як кліматичних, так і воєнних чинників, що призводять до деградації екосистем і зниження адаптивного потенціалу громад. На сьогодні відсутні комплексні дослідження, що дозволяють одночасно враховувати типи землекористування, показники вологості, покриття рослинності та потенційну чутливість до кліматичних екстремумів у межах конкретної громади. Запропоноване в статті дослідження дозволяє частково заповнити цю прогалину, демонструючи можливості просторового аналізу як інструменту підтримки прийняття рішень для екологічного управління в умовах зміни клімату та післявоєнної відбудови.

Новизна роботи полягає у використанні супутникових даних та геоінформаційного моделювання для визначення просторової вразливості Дергачівської громади до літніх кліматичних екстремумів. Отримані результати дозволяють деталізувати рівень вразливості для різних ландшафтних категорій з урахуванням індексу вологості поверхні та інтегрованої класифікації зон ризику.

Методологічне або загальнонаукове значення полягає у впровадженні інтегрованого просторово-аналітичного підходу до оцінки кліматичної вразливості територіальних громад. Поєднання даних дистанційного зондування Землі, типів земного покриття та геоінформаційного аналізу дозволяє проводити деталізовану просторову діагностику вразливості ландшафтів до кліматичних екстремумів. Такий підхід є універсальним і може бути адаптований для інших територій, зокрема для обґрунтування природоохоронних, планувальних та адаптаційних рішень на локальному рівні.

Загальнонаукове значення дослідження полягає в уточненні та апробації індикаторного підходу до просторової оцінки вразливості територій до зміни клімату. Робота розширює можливості використання ГІС і супутникових даних у регіональних екологічних дослідженнях, зокрема для потреб стратегічного планування, просторового розвитку, управління природними ресурсами та адаптації до кліматичних ризиків.

Викладення основного матеріалу. Дергачівська міська територіальна громада розташована на півночі Харківської області, в межах Харківського району, та входить до приміської зони м. Харкова. Загальна площа громади становить 544 км². До її складу входять місто Дергачі, три селища міського типу, три селища та 31 село. Частина населених пунктів розташована у безпосередній близькості до державного кордону та зони бойових дій, що зумовлює додаткові ризики та виклики для сталого розвитку.

За оцінками середини 2024 року фактичне населення скоротилося приблизно до 22 тис. осіб. Економіка громади базується переважно на сільському господарстві, а також на харчовій, легкій промисловості та машинобудуванні. Громада зазнала значних руйнувань внаслідок повномасштабного вторгнення у 2022–2024 рр. Окрім безпекових ризиків, територія демонструє ознаки кліматичної вразливості, зокрема щодо посух і зростання екстремальних температур.

Клімат району – вологий континентальний, із середньорічною кількістю опадів близько 600 мм. Останні десятиліття характеризуються сталим потеплінням: середньорічна температура в Дергачах зросла з 6–8 °С у середині ХХ ст. до понад 10,5 °С у 2022 році. Паралельно з цим фіксується збільшення частоти кліматичних екстремумів.

Територія громади розташована в межах Середньоросійської височини і належить до зони лісостепу. Основні ґрунти – чорноземи, сірі та дерново-підзолисті. Гідрографічну сітку формує річка Лопань (притока р. Уди) та численні дрібні водні об'єкти. Значну роль у забезпеченні водного балансу відіграють атмосферні опади, з яких більша частина повертається до атмосфери через випаровування та транспірацію. У сукупності ці фактори створюють передумови для формування локальних осередків

підвищеної вразливості до зміни клімату, зокрема щодо дефіциту вологи, що й зумовило необхідність проведення просторового аналізу в межах цієї території.

Для проведення оцінки вразливості території Дергачівської міської територіальної громади до кліматичних екстремумів використано методи просторового аналізу в середовищі QGIS (версія 3.28.5-Firenze). Просторовий аналіз охоплював обробку відкритих супутникових геоданих та розрахунок показників, що визначають потенційну вразливість до теплових хвиль і посух.

Для виявлення просторових чинників кліматичної вразливості території було здійснено аналіз типів покриття земної поверхні в межах Дергачівської міської територіальної громади на основі глобального растрового набору даних ESA WorldCover 10m [19] за 2021 рік (рис. 1).

Такий аналіз дозволив визначити просторову структуру території за типами покриття, з подальшим обчисленням частки кожного класу у загальній площі. Аналіз показав, що найбільшу частку території громади займають сільськогосподарські угіддя – близько 49,4 %, що свідчить про переважно аграрний характер землекористування. Деревна рослинність (ліси) займає близько 29,2 % площі, переважно у вигляді лісових масивів та лісосмуг, що є важливим буфером для пом'якшення кліматич-

них екстремумів. Трав'яниста рослинність охоплює 18,0 % території та, ймовірно, включає як природні луки, так і неактивні сільськогосподарські угіддя. Інші категорії займають незначні частки: забудовані території – лише 1,8 %, що свідчить про обмежений масштаб урбанізованої зони; постійні водні об'єкти – 1,1 %, трав'янисті заболочені ділянки – 0,4 %, а оголені поверхні або розріджена рослинність – 0,1 %.

Структура земного покриву свідчить про відносно, високу потенційну буферність території до змін мікроклімату завдяки наявності лісових масивів, хоча висока частка орних земель вимагає додаткового аналізу з точки зору вразливості до деградації, перегріву та втрати вологи. Урбанізовані ділянки, попри їх незначну частку, можуть становити осередки локального перегріву, особливо в умовах щільної забудови без належного озеленення.

Для оцінки кліматичної вразливості території громади застосовано підхід, що передбачає побудову індексу просторової вразливості на основі типів покриття земної поверхні. Методологія базується на припущенні, що різні категорії землекористування мають різну здатність протистояти негативним наслідкам екстремальних температур і посух.

Кожному типу покриття надано умовну оціночну вагу вразливості у шкалі від 1 (найменша вразливість) до 3 (найвища вразливість), на основі даних щодо їх здатності до збереження вологості ґрунту,

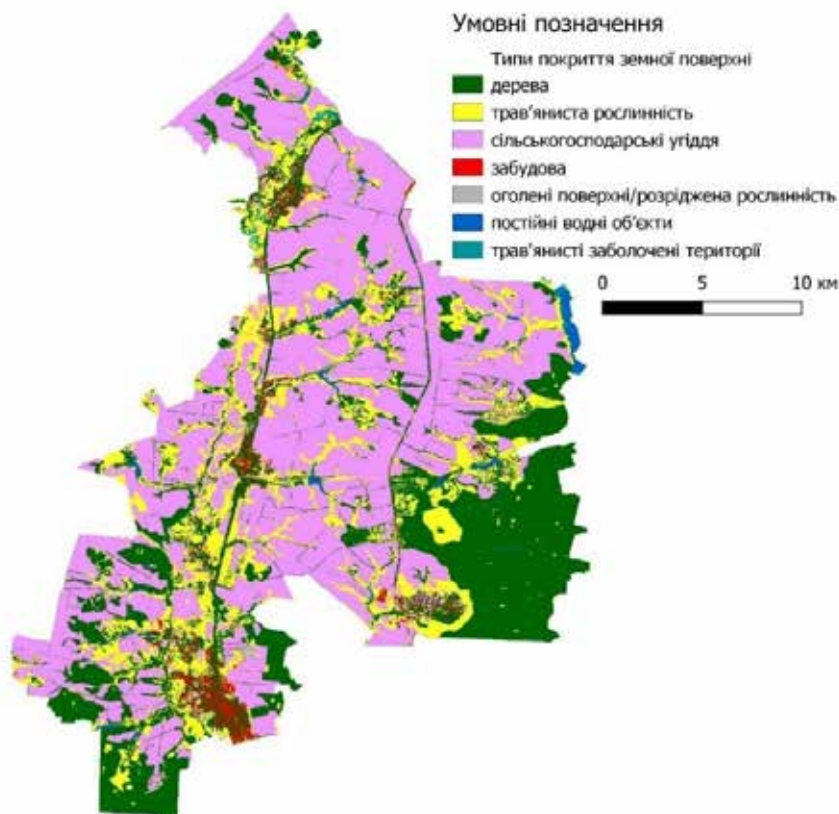


Рис. 1. Карта типів покритті земної поверхні території Дергачівської громади

зниження температури поверхні, забезпечення екосистемних послуг у періоди кліматичних екстремумів. Розподіл оцінок наведено в таблиці 1.

Іншим важливим фізико-географічним фактором, що впливає на мікроклімат та умови зволоження, є експозиція схилів. В дослідженні на основі цифрової моделі рельєфу SRTM [20] було побудовано карту експозиції території Дергачівської громади (рис. 2).

Експозиція безпосередньо впливає на мікроклімат схилу: південні, південно-західні та західні

схили в умовах Північної півкулі зазвичай отримують більше сонячного випромінювання, отже, швидше прогріваються, більше втрачають вологу та сильніше висихають, особливо в умовах літніх посух. Це чинить додатковий тиск на сільськогосподарські угіддя, які переважно розміщені саме на відкритих ділянках.

Натомість північні та північно-східні схили є прохолоднішими, вологішими, менш вразливими до перегріву та тривалих періодів без опадів.

Таблиця 1

Ранжування вразливості типів покриття земної поверхні до зміни клімату

Тип покриття	Вразливість	Пояснення
Дерева	1	Знижують температуру, зберігають вологу, пом'якшують клімат
Трав'яниста рослинність	2	Частково стабілізує мікроклімат, але схильна до висихання
Сільськогосподарські угіддя	3	Схильні до перегріву, втрати вологи, ерозії, залежать від типу обробки
Забудова (штучні поверхні)	3	Поглиблюють ефект «острова тепла», не утримують вологу
Оголені поверхні / розрізана рослинність	3	Погано захищені, перегріваються, легко деградують
Постійні водні об'єкти	1	Пом'якшують локальний мікроклімат, стабілізують температуру
Трав'янисті заболочені території	2	Зволожують локальне середовище, мають буферний ефект

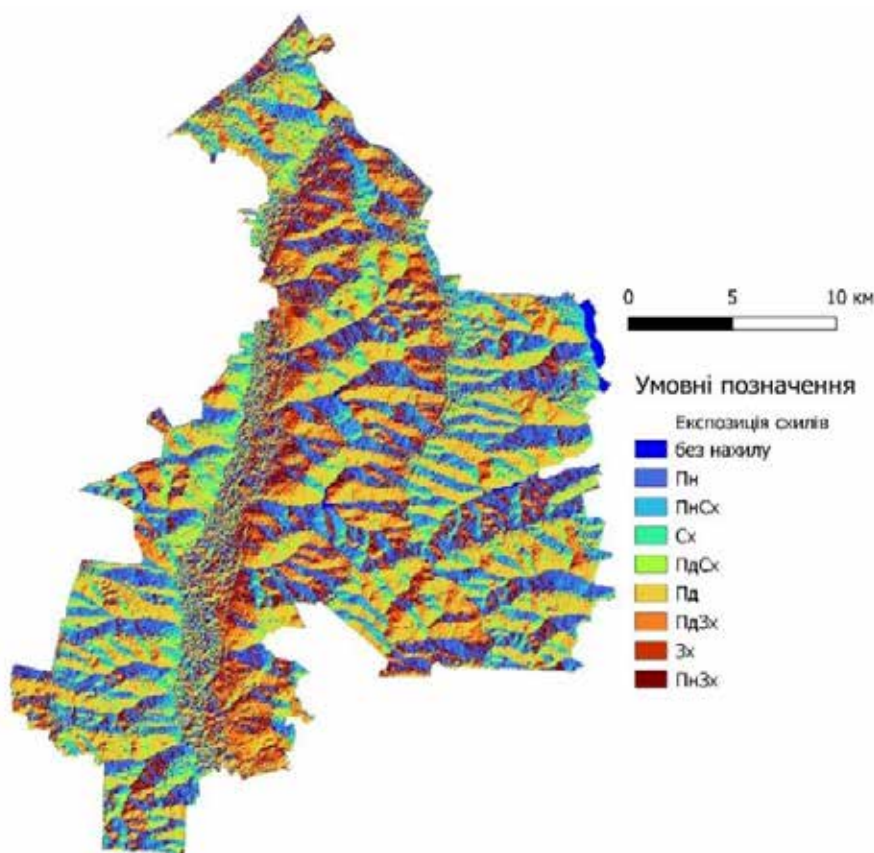


Рис. 2. Карта експозиції схилів території Дергачівської громади

Таблиця 2

Шкала для перекласифікації растру зміни індексу вологості

$\Delta NDMI$	Інтерпретація
< -0.2	Сильне висихання
-0.2 до -0.05	Слабке висихання
-0.05 до $+0.05$	Незначні або відсутні зміни
$+0.05$ до $+0.2$	Слабке зволоження
$> +0.2$	Сильне зволоження

Рекласифікація карти експозиції за шкалою від 1 (північні, північно-східні та північно-західні схили) до 3 (південно-східні, південні та південно-західні схили) дозволяє інтегрувати цей фактор у комплексну оцінку вразливості, поєднуючи його з іншими екологічними і ландшафтними змінними.

Для виявлення просторових змін у стані покриття Дергачівської територіальної громади було здійснено аналіз супутникових даних Sentinel-2A за літній період 2024 року. Зображення за 9 липня 2024 р. та 18 серпня 2024 р. було отримано з ресурсу EO Browser [20] на основі комбінації каналів B08 (NIR, 842 нм) та B11 (SWIR, 1610 нм). Ці канали були обрані для розрахунку нормалізованого індексу вологості (NDMI), що є чутливим до змін у водному вмісті рослинної біомаси. На кожному із знімків (відповідно до обраних дат) було створено NDMI-растр за стандартною формулою:

$$NDMI = \frac{B08 - B11}{B08 + B11}$$

Надалі для оцінки змін вологості впродовж літнього періоду було розраховано растр різниці NDMI ($\Delta NDMI$) за формулою:

$$\Delta NDMI = NDMI_{18.08.2024} - NDMI_{09.07.2024}$$

Результуючий шар був підданий перекласифікації за п'ятьма класами змін вологості (табл. 2).

Отримані результати свідчать про переважне зменшення вмісту вологості на території громади в аналізований період (рис. 3). Так, сильне висихання охопило 28,0% території; слабе висихання – 36,5%; стабільність у вологості спостерігалася на 25,9% площі; лише 7,8% території зазнали слабкого зволоження, і менше 2% – сильного зволоження.

Домінування зон висихання вказує на переважання посушливих умов у серпні 2024 року порівняно з першою половиною літа, що може бути пов'язано з високими температурами, зменшенням кількості опадів, а також з потенційним впливом на рослинне покриття (особливо трав'янисту рослинність і сільськогосподарські угіддя).

Було проведено зіставлення типів покриття за даними ESA WorldCover [19] та просторового роз-

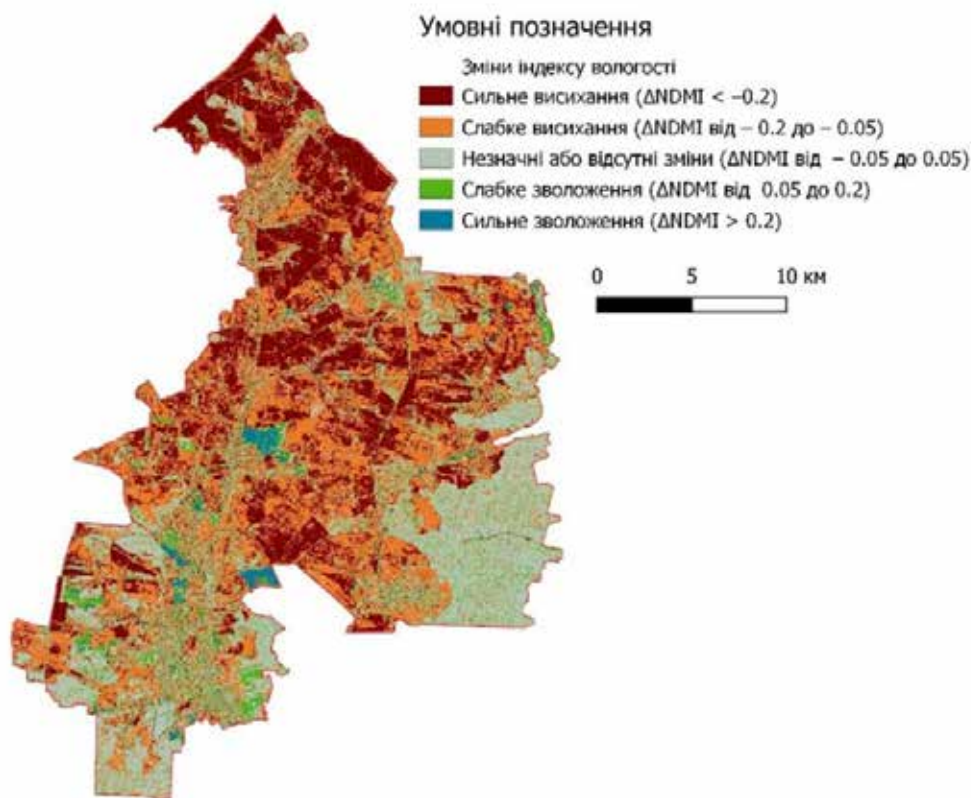


Рис. 3. Просторовий розподіл змін індексу вологості NDMI між 9 липня та 18 серпня 2024 року на території Дергачівської громади

поділу значень індексу вологості, що дозволило оцінити вразливість різних ландшафтних категорій до літнього висихання та кліматичних стресів (табл. 3). Найбільші площі сильного висихання зафіксовано в межах сільськогосподарських угідь (121,8 км²), що підтверджує їх високу чутливість до кліматичних стресів. Значна частина територій із слабким висиханням представлена також трав'янистою рослинністю (50,2 км²) та лісами (36,0 км²), що вказує на поширеність легких порушень водного балансу навіть у стійкіших екосистемах. Водночас ліси демонструють домінування стабільного режиму

вологості (93,7 км²), що свідчить про їхню буферну роль у ландшафтній системі громади.

З метою просторової ідентифікації вразливих до посухових явищ територій, було побудовано карту поєднання типів покриття з високим рівнем чутливості до кліматичних стресів (сільськогосподарські угіддя, трав'яниста рослинність, заболочені території) із зонами, де зафіксовано істотне зниження індексу вологості. Такий підхід дозволив виділити потенційно критичні ділянки, які потребують пріоритетного моніторингу або адаптаційних заходів в умовах зміни клімату (рис. 4).

Таблиця 3

Розподіл змін індексу вологості за категоріями типів покриття в межах Дергачівської громади

	Сильне висихання	Слабке висихання	Незначні або відсутні зміни	Слабке зволоження	Сильне зволоження
Дерева	6%	23%	59%	11%	1%
Трав'яниста рослинність	20%	51%	19%	8%	2%
Сільськогосподарські угіддя	45%	40%	8%	4%	2%
Забудова	6%	30%	36%	23%	5%
Оголені поверхні / розріджена рослинність	3%	21%	53%	21%	2%
Постійні водні об'єкти	15%	15%	26%	27%	17%
Трав'янисті заболочені території	8%	36%	37%	16%	3%

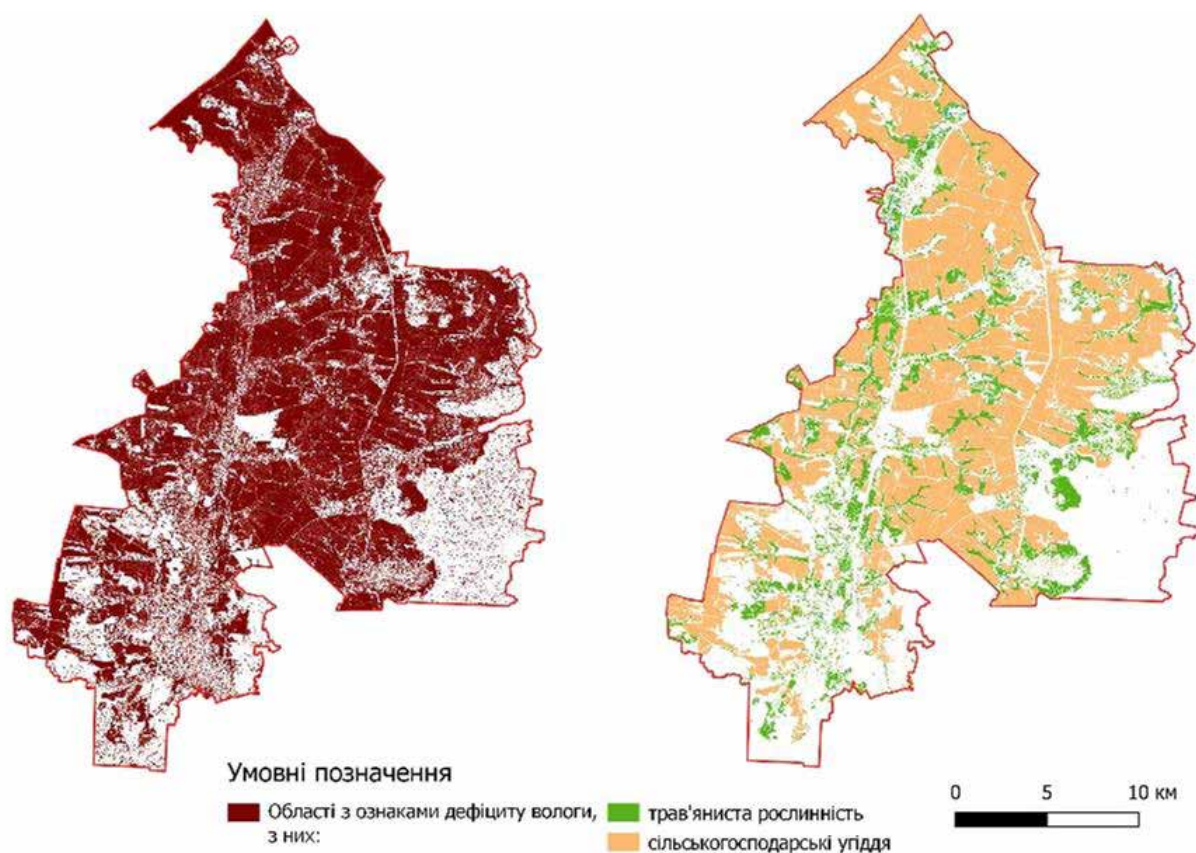


Рис. 4. Карта поєднання типів покриття з високим рівнем чутливості до кліматичних стресів з областями з ознаками дефіциту води

Для комплексної оцінки просторової вразливості території Дергачівської громади до кліматичних ризиків, зокрема до посух і екстремальних температур у літній період, запропоновано використати інтегрований індекс вразливості, який поєднує кілька просторових факторів, що можуть суттєво впливати на чутливість екосистем та землекористування до кліматичних екстремумів: експозицію схилів, тип землекористування, а також динаміку вологості ґрунту, визначену за допомогою індексу NDMI.

Для кожного із шарів використовувалась трибальна шкала (1 – низька вразливість, 2 – середня, 3 – висока), згідно з наступною логікою:

- південні, південно-східні та південно-західні експозиції класифікувались як найбільш вразливі (3), західні та східні – як середньо вразливі (2), а північні та плоскі ділянки – як найменш вразливі (1), враховуючи вплив сонячної радіації на пересихання ґрунту в літній період,

- сільськогосподарські угіддя, розріджена рослинність та оголені площі віднесені до найбільш чутливих (3), трав'яниста рослинність і заболочені ділянки – до середньої вразливості (2), а лісові масиви та забудовані території – до менш вразливих (1),

- зони з сильним висиханням (від'ємні значення, що перевищують поріг -0.2) класифікувались як вразливі (3), слабе висихання (від -0.2 до -0.05) – як середньо вразливі (2), стабільні або зволожені ділянки – як менш вразливі (1) (рис. 5).

Об'єднання трьох факторів здійснювалося за формулою:

$$I = (W_1 \times \text{експозиція} + W_2 \times \text{покриття} + W_3 \times \text{MI})$$

де W_1 – W_3 – вагові коефіцієнти кожного шару.

В нашому дослідженні ваги були прийняті рівними ($W_1 = W_2 = W_3 = 1$), однак модель дозволяє адаптацію ваг відповідно до конкретних дослідницьких цілей (наприклад, посилення впливу показника вологості у посушливих регіонах).

Результуючий растр було перекласифіковано на 3 градації вразливості: низька, середня, висока. Карта індексу вразливості дозволяє виявити території, які потенційно зазнають найбільшого впливу кліматичних екстремумів, та оцінити співвідношення категорій землекористування в межах цих зон (рис. 6).

Одержані результати варто інтерпретувати з урахуванням низки факторів, які могли вплинути на точність оцінки просторової вразливості території Дергачівської громади до висихання у літній період 2024 року.

По-перше, аналіз ґрунтувався на супутникових даних Sentinel-2 за дві дати (09.07.2024 та 18.08.2024), що не дозволяє повністю врахувати динаміку сезонних змін. Частина виявлених змін NDMI, особливо на сільськогосподарських угіддях, може відображати не лише кліматичні фактори, а й типову для регіону агросезонну динаміку, зокрема завершення вегетації сільськогосподарських культур у серпні. Для більш

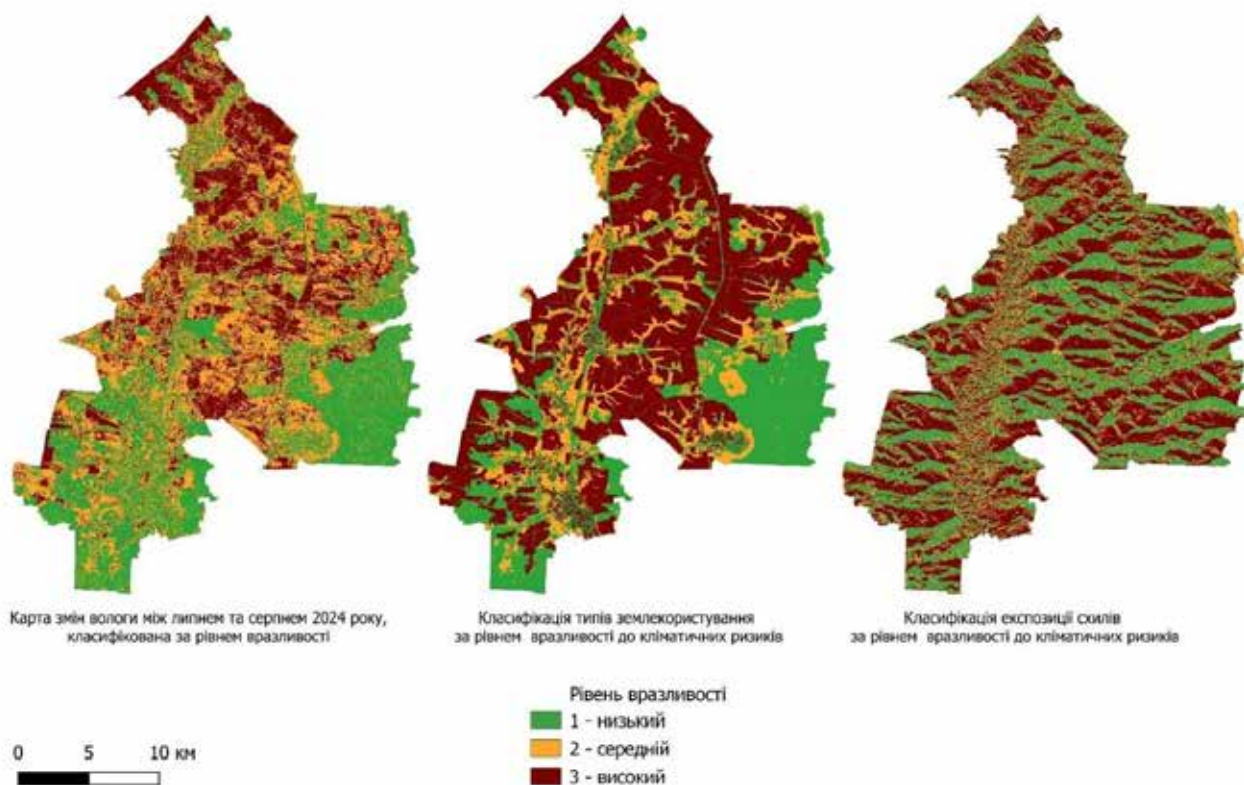


Рис. 5. Перекласифіковані шари

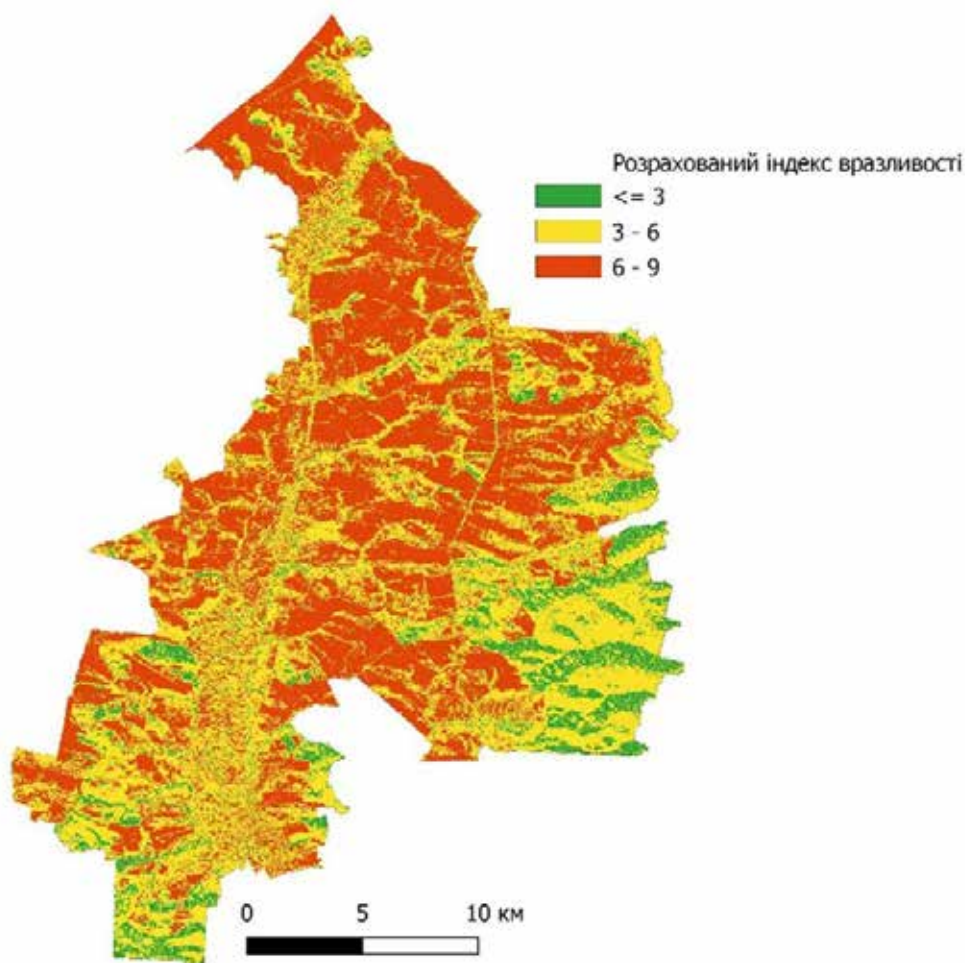


Рис. 6. Результуючий растр розрахунку комплексного індексу вразливості території Дергачівської громади до кліматичних ризиків

достовірної оцінки вразливості рослинного покриву до кліматичних стресів доцільно використовувати багаторічні дані або порівняння значень індексу в межах одного вегетаційного періоду між роками з різною агрокліматичною ситуацією.

По-друге, використані для аналізу сільськогосподарські угіддя становлять значну частину території громади, проте у зв'язку з воєнними діями, що тривають у регіоні з 2022 року, частина цих земель могла бути не оброблена у 2024 році. У таких випадках спостерігається зміна характеру землекористування: на полях, які не засівались, могли розвиватися процеси вторинної сукцесії – тобто природного відновлення трав'янистої чи чагарникової рослинності. Це могло зумовити відносно високі значення індексу вологості (NDMI) навіть у серпні, коли зазвичай на оброблених полях відбувається зниження вегетаційної активності через збір урожаю.

Крім того, в умовах війни спостерігається просторово неоднорідна мозаїка землекористування, з чергуванням ділянок, які залишаються активними в агровиробництві, з покинутими або мінованими територіями. Така гетерогенність ускладнює автома-

тизовану інтерпретацію індексів і вимагає локальної верифікації або інтеграції з додатковими джерелами інформації (зокрема, польовими даними, класифікацією типів покриття, даними моніторингу посівних площ тощо).

З огляду на вищезазначене, отримані результати варто розглядати як пілотну оцінку вразливості території до літнього висихання, яка потребує подальшого поглиблення у наступних дослідженнях.

Висновки. У рамках цього дослідження було здійснено комплексну просторову оцінку вразливості Дергачівської міської територіальної громади до екстремальних температур і посушливих умов, спричинених змінами клімату. Проведено класифікацію землекористування на основі даних ESA WorldCover, що дозволило виявити домінування сільськогосподарських угідь (майже 50 % площі) та лісових масивів (понад 29 %), які є критично важливими з точки зору впливу кліматичних чинників. Аналіз змін індексу вологості, побудованого за супутниковими знімками Sentinel-2 за липень і серпень 2024 року, показав, що понад 60 % території громади зазнали висихання різного ступеня, з них

28 % – сильного висихання. Особливо вразливими виявилися сільськогосподарські угіддя, трав'яниста рослинність і частково забудовані території. Карта експозиції схилів на основі даних SRTM дала змогу врахувати мікрокліматичні особливості території. На основі перекласифікації трьох шарів (типів землекористування, експозиції схилів та змін індексу вологості) побудовано підхід до інтегральної оцінки просторової вразливості. Метод дозволяє виявляти пріоритетні зони ризику для прийняття управлінських рішень.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають практичне зна-

чення для розробки локальних стратегій адаптації до змін клімату, документів державного планування та проведення стратегічної екологічної оцінки та інших видів екологічних оцінок, включаючи оптимізацію землекористування, заходи з підвищення стійкості агроєкосистем та планування використання водних ресурсів. У подальших дослідженнях доцільно розширити спектр аналізованих змінних, включити багаторічні ряди супутникових даних, а також враховувати соціально-економічні аспекти кліматичної вразливості. Особливо актуальним є дослідження динаміки відновлення земель, що постраждали внаслідок воєнних дій, в умовах зміни клімату

Література

1. Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2023: Synthesis Report. Longer Report. 2023. URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf (дата звернення: 16.07.2025)
2. Краковська С., Криштоп Л. Узагальнена оцінка впливу зміни клімату в Україні. GIZ, 2024. 86 с. URL: <https://ukrainian-climate-office.org/library/> (дата звернення: 16.07.2025).
3. Reshetchenko S., Popovych N., Shulika B., Porvan A., Cherkashyna N. Evaluation of the environmental status of agricultural resources in the territory of Ukraine under conditions of climate change. *Technology Audit and Production Reserves*. 2018. № 3(3(41)). С. 21–32. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.134890> (дата звернення: 16.07.2025).
4. The Vulnerability Sourcebook – Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. GIZ, adelphi, EURAC. Eppelheim, 2014. 180 р. URL: <https://adelphi.de/en/publications/the-vulnerability-sourcebook-concept-and-guidelines-for-standardised-vulnerability> (дата звернення: 16.07.2025).
5. How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan (SECAP). Part 2 – Baseline Emission Inventory (BEI) and Risk and Vulnerability Assessment (RVA) / ed. Bertoldi P. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018. 126 p.
6. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату : Наказ Міндовкілля України № 386 від 03.06.2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0386926-23#Text> (дата звернення: 18.07.2025).
7. Дядін Д., Дрозд О. Аналіз методологічних підходів оцінки ризиків і вразливості до зміни клімату на рівні територіальних громад. *Екологічні науки*. 2024. № 6(57). С. 237–243.
8. Про схвалення Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату в Україні на період до 2030 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 20 жовтня 2021 р. № 1363-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-r#Text> (дата звернення: 15.07.2025).
9. Про основні засади державної кліматичної політики : Закон України від 30 жовтня 2024 р. № 3991-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3991-20#Text> (дата звернення: 15.07.2025).
10. Методичні рекомендації щодо врахування кліматичного компонента в документах державного планування та під час здійснення стратегічної екологічної оцінки: Наказ Міндовкілля України № 1382 від 31.10.2024 р. URL: <https://mepr.gov.ua/nakaz-mindovkillya-1382-vid-31-10-2024/> (дата звернення: 15.07.2025).
11. Inostroza L., Palme M., de la Barrera F. A Heat Vulnerability Index: Spatial Patterns of Exposure, Sensitivity and Adaptive Capacity for Santiago de Chile. *PLoS ONE*. 2016. Vol. 11, № 9. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162464> (дата звернення: 16.07.2025).
12. Kumar P., Geneletti D., Nagendra H. Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India. *Land Use Policy*. 2016. Vol. 58. P. 514–532. URL: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.08.018> (дата звернення: 19.07.2025).
13. Shakya R., Khan S. Climate Change Vulnerability through Spatial Assessment: A Study of Central India. *Natural Hazards Review*. 2024. Vol. 25, Issue 3. URL: <https://doi.org/10.1061/NHREFO.NHENG-1980> (дата звернення: 19.07.2025).
14. Badaloni C., De Sario M., Caranci N. et al. A spatial indicator of environmental and climatic vulnerability in Rome. *Environment International*. 2023. Vol. 176. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107970> (дата звернення: 16.07.2025).
15. Букша І. Ф., Швиденко А. З., Бондарук М. А., Целіщев О. Г., Пивовар Т. С., Букша М. І., Пастернак В. П., Краковська С. Методологія моделювання та оцінювання впливу зміни клімату на лісові фітоцинози України. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2017. Вип. 266. С. 26–38. URL: https://www.researchgate.net/publication/329360941_Metodologia_modeluvanna_ta_ocinuvanna_vplivu_zmini_klimatu_na_lisovi_fitocinozi_Ukraini (дата звернення: 16.07.2025).
16. Стратегія адаптації до зміни клімату для Івано-Франківської області. Міжнародний проєкт «Посилення спроможності регіональних та місцевих адміністрацій щодо імплементації та виконання законодавства ЄС щодо охорони навколишнього середовища та зміни клімату та розвитку інфраструктурних проєктів – EuropeAid/140209/DH/SER/UA». 2024. URL: <https://www.if.gov.ua/dovkillya/strategiia-adaptatsii-do-zminy-klimatu-dlia-ivano-frankivskoi-oblasti> (дата звернення: 16.07.2025).
17. Шевченко О., Власюк О., Ставчук І., Ваколюк М., Ілляш О., Рожкова А. Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна. Київ : Myflaer, 2014. 74 с.
18. Niu Y., Shen Y., Qiu Y. A Systematic Review of the Development and Validation of the Heat Vulnerability Index: Major Factors, Methods, and Spatial Units. *Current Climate Change Reports*. 2021. Vol. 7. P. 87–97. URL: <https://doi.org/10.1007/s40641-021-00173-3> (дата звернення: 16.07.2025).

19. ESA WorldCover. URL: <https://esa-worldcover.org/en/data-access> (дата звернення: 16.07.2025).
20. SRTM. URL: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/srtm> (дата звернення: 16.07.2025).
21. EO Browser by Sentinel Hub. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (дата звернення: 16.07.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ОЦІНКА РИЗИКІВ, ПОВ'ЯЗАНИХ ІЗ ДЕМОГРАФІЧНИМИ ВТРАТАМИ НАСЕЛЕННЯ УКРАЇНИ

Грабко Н.В., Колісник А.В., Чернякова О.І., Романчук М.Є., Вовкодав Г.М.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, 65045, м. Одеса

grabkonatalyavikt@gmail.com, kolisnyk.a.v@gmail.com, oksvital65@gmail.com,

mmromanchuk67@gmail.com, galinakoltykova258@gmail.com

Останні десятиліття характеризувалися для України сталим скороченням населення, як міського, так і сільського. З цієї проблемою пов'язано визначення ризику демографічних втрат населення, під яким у найбільш загальному вигляді розуміють ризик скорочення населення за рахунок природного і міграційного приросту. В цьому дослідженні показано негативну динаміку населення України протягом 1991-2021 років, співвідношення міського і сільського населення (в останні роки вона вказувало, що Україна майже досягла стану високоурбанізованої території). Встановлено, що загальний приріст (скорочення) населення України характеризувався від'ємними значеннями, починаючи з 1993 року. Це пов'язано із від'ємними значеннями природного приросту протягом всього періоду. Міграційний приріст населення приймав як позитивні, так і негативні значення. Але останні роки його внесок у загальні зміни кількості населення складав лише декілька відсотків. Отже, основним демографічним показником, відповідальним за формування демографічних втрат населення, є природний приріст населення, що залежить від співвідношення народжуваності і смертності. Аналіз змін цих показників у 2019-2021 роках показав порушення критичних значень у Київській області (народжуваність), а також у Запорізькій, Миколаївській і Харківській областях (смертність і природний приріст). За допомогою нормального закону розподілу були оцінені ризики демографічних втрат населення, обумовлені збільшенням смертності і скороченням народжуваності та природного приросту населення. Картування останнього показало чіткий територіальний розподіл з мінімальними значеннями ризиків в областях Західної України і максимальними – на південному сході. Така залежність добре пояснюється ступенем антропогенного перетворення ландшафтів, що вказує на наявність екологічної складової проблеми. *Ключові слова:* ризик, демографічні втрати населення, природний приріст населення, міграційний приріст населення, народжуваність, смертність.

Assessment of risks associated with demographic losses of the population of Ukraine Hrabko N., Kolisnyk A., Chernyakova O., Romanchuk M., Vovkodav G.

Recent decades have been characterized by a steady decline in the population of Ukraine, both urban and rural. This problem is related to the identification of the risk of demographic losses of the population, which is generally understood as the risk of population decline due to migration and natural growth. This study shows the negative population dynamics in Ukraine during 1991-2021, the ratio between the urban and rural population (in recent years it indicated that Ukraine has almost reached the state of a highly urbanized territory). It was established that the total growth (reduction) of the population of Ukraine was characterized by negative values, starting from 1993. This is due to the negative values of natural growth throughout the indicated period of time. The migration growth of the population saw both positive and negative values. However, in recent years, its contribution to the overall population change has been only a few percent. Thus, the main demographic indicator responsible for the formation of demographic losses of the population is the natural population growth, which depends on the ratio of birth and death rates. The analysis of changes in these indicators in 2019-2021 showed that critical thresholds being crossed in the Kyiv region (birth rate), as well as in Zaporizhia, Mykolaiv, and Kharkiv regions (mortality and natural growth). The risks of demographic population losses caused by an increase in mortality and a decrease in birth rate and natural population growth were assessed using the normal distribution law. Mapping of the latter showed a clear territorial distribution with minimal risk values in the regions of Western Ukraine and maximum levels in the southeast. This dependence is well explained by the degree of anthropogenic landscape transformation, which indicates the presence of an ecological component of the problem. *Key words:* risk, demographic population losses, natural population growth, population migration growth, birth rate, mortality.

Постановка проблеми. Сучасна демографічна ситуація в Україні залишається дуже складною. Багато інформаційно-популярних та наукових джерел вказують на істотне скорочення чисельності населення. Особливо гостро це питання повстало з 2022 року. Але ще у роки до початку бойових дій процеси депопуляції в країні протікали досить інтенсивно. Таку ситуацію можна вважати передумовою для визначення основних факторів ризику, що вплинули на скорочення населення у мирний період, для

подальшого порівняння з ситуацією, що склалася у останні декілька років. Представлене дослідження присвячено попередній оцінці факторів ризику збільшення демографічних втрат населення в розрізі регіонів (областей) України як одного з інтегральних екологічних показників території. Метою проведеного дослідження стала характеристика демографічної ситуації в Україні і визначення та оцінка ризиків демографічних втрат населення з врахуванням екологічної складової.

Актуальність дослідження. Проблема визначення ризиків залишається актуальною для великого кола питань, пов'язаних як із фундаментальними дослідженнями, так і з практичною діяльністю; має виражену складову у різноманітних наукових і прикладних дослідженнях; посіла визначне місце у навчальній діяльності і вирішенні важливих практичних питань.

Питання визначення ризиків повною мірою стоюється різноманітних аспектів екологічного характеру. Якісна і кількісна оцінка ризиків широко застосовується під час розробки і створення навчальних дисциплін, пов'язаних із вивченням основних факторів навколишнього середовища і їх впливу на людину (таких як «Загальна екологія», «Екологія людини», «Екологічна безпека» та ін.). Крім того, вивчення ризиків демографічного характеру слід вважати актуальним з точки зору врахування під час оцінки демографічної і екологічної ситуації в Україні протягом і після закінчення бойових дій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Запропоноване дослідження з наукової точки зору представляє собою доповнення досить обмежених розробок у галузі визначення ризику демографічних втрат, а його особливістю у науковому плані слід вважати зв'язок демографічної ситуації з екологічною. З практичної точки зору дослідження представляє собою певну базу для розробки заходів щодо подолання наслідків демографічної кризи у нашій державі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні десятиліття з'явилася велика кількість наукових і навчально-прикладних публікацій, присвячених загальним питанням визначення і оцінки ризиків [1-10]. Літературні джерела переважно навчального характеру [1-2] містять загальну інформацію щодо визначення екологічних ризиків – основні визначення поняття «ризик», основні терміни і загальні підходи для визначення ризику. Наукові публікації теоретичного характеру з цього приводу [3-5] надають більш детальну інформацію щодо визначення ризиків, а саме, В.В. Добровольський визначає зв'язки у принципових взаємодіях факторів ризику [3] і надають різноманітні визначення й детальні класифікації ризиків [3-4].

Дослідження у галузі визначення ризику демографічних втрат представлені у роботах Ю.Б. Феленчак [6-9], причому теоретично-класифікаційний опис ризиків представлений у джерелах [6-7], а практична оцінка підвищення демографічних втрат (на прикладі Львівської області) представлена у [8-9]. Певну частину літературних джерел складають публікації, присвячені досить простим і зрозумілим методам оцінки ризиків медичного або демографічного характеру, у тому числі [10].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена

стаття. У цій статті вивчено основні демографічні тенденції України в останні десятиліття, в тому числі в контексті питання **урбанізації**. Здійснено уточнення поняття ризику демографічних втрат. Проаналізовані демографічні показники, які слід враховувати для визначення ризику демографічних втрат населення. Оцінені, проаналізовані і частково картовані основні складові цих ризиків.

Новизна. У представленій статті уперше проведено оцінку ризиків, пов'язаних із демографічними втратами, пов'язаними з природним скороченням населення, в регіонах України. Певну увагу приділено визначенню основних демографічних показників, які можуть бути враховані під час оцінки ризиків демографічних втрат населення. Розрахунок, аналіз і картування розрахованих ризиків в межах областей України уперше показали ситуацію у територіальному розрізі і дозволили осмислити просторові особливості розподілу отриманих характеристик.

Методологічне або загальнонаукове значення. В роботі застосовані методики оцінки ризику демографічних втрат населення, запропоновані в роботах Ю.Б. Феленчак [8-9]. Згідно із методикою, представленою у [8-9] під демографічними втратами населення слід розуміти його скорочення, пов'язане із його зменшенням за рахунок як природного (різниця між народжуваністю і смертністю), так і міграційного (різниця між кількістю прибулих і кількістю вибулих) приросту населення.

Такі демографічні показники, як народжуваність, смертність і природний приріст населення за думкою сучасних дослідників, одночасно слід вважати тими, що у найбільш загальному вигляді характеризують процеси розвитку населення за умов великих контингентів людей [11]. Демографічні показники (особливо у їхній динаміці) можна вважати найбільш узагальненими інтегральними характеристиками екологічної ситуації.

Саме ці показники переважно застосовані у цьому дослідженні, хоча досить перспективним у цьому відношенні слід вважати й смертність від окремих причин, середню очікувану тривалість життя та деякі показники репродуктивного здоров'я, а також показники медичної статистики.

Матеріали, що послужили вихідними даними (показники демографічної статистики в Україні, отримані з офіційних джерел [13-15]), стосуються періоду до 2021 року (в цілому 1991-2021 роки), оскільки з початком бойових дій у 2022 році ситуація у країні принципово змінилася, а отже, цей період вимагає окремого спеціального вивчення. Дані про кількість населення, представлені по 2022 рік, то цей показник встановлюється на 1 січня наступного року. Отже фактично стосуються року попереднього, для якого вони показані.

З методологічної точки зору також важливо зазначити, що у дослідженнях ризиків, пов'язаних із застосуванням демографічних показників і показ-

ників здоров'я найчастіше застосовується апроксимація масивів демографічних (або медичних) даних нормальним законом розподілу [12]. Застосована ця методика і у представленій роботі.

Н. Опополь для оцінки ризику погіршення здоров'я населення під впливом факторів довкілля пропонує застосовувати спрощений статистичний критерій – ступінь відхилення показника здоров'я (у тому числі демографічних показників) від його критичного значення на певному рівні впливу. Як критичне значення $M_{кр}$ застосовується відхилення показника (у гірший бік) від його середнього вибіркового значення, що має 5-% забезпеченість:

$$M_{кр} = M \pm 1,96\sigma, \quad (1)$$

де M – середнє вибіркве значення;

σ – стандартне відхилення вибірки.

Цей же автор пропонує застосовувати дані демографічної (або медичної) статистики за період 3-5 років. На цій підставі для визначення основних статистичних характеристик і розрахунку $M_{кр}$ використовувалися значення таких демографічних показників, як народжуваність, смертність і природний приріст населення за останні 3 роки (2019-2021), представлені надійними вихідними даними по областях України і отримані з [13-15].

Викладення основного матеріалу. Оцінку демографічної ситуації в Україні можна почати із загальної характеристики ситуації на тлі країн Євросоюзу. За даними на 1 січня 2022 року на території України мешкало 42,1 млн. осіб, що робило її однією з найбільш густонаселених країн – за кількістю населення Україна поступалася лише Німеччині, Франції, Італії

і Іспанії [15]. Але порівняння інших демографічних показників із ситуацією в країнах Євросоюзу показує, що демографічна ситуація в Україні є досить складною. А саме, в Україні майже найбільше серед країн Євросоюзу співвідношення чоловіків і жінок – за даними на 2021 рік це – 1115 жінок на 1000 чоловіків (менш сприятлива ситуація лише у Латвії – 1163 жінки на 1000 чоловіків) [15]. На 2020 рік середня очікувана тривалість життя в Україні найменша – 66,4 роки у чоловіків і 76,2 роки у жінок [15]. А за значенням сумарного коефіцієнту народжуваності (за даними 2020 року) Україна знаходилася на передостанньому місці після Мальти – 1,22 народжень на 1 жінку [15].

Деталізувати ситуацію можна за допомогою динаміки кількості населення України, представленій на рис. 1. Можна побачити, що кількість населення України незначно зростала лише на початку дев'яностих років, а далі почалося досить стійке зменшення на протязі всього періоду 1994-2021 років. В цілому цей показник зменшився з 52,2 млн осіб у 1993 році до 41,2 млн. осіб у 2021 році. Така динаміка була синхронною як для міського, так і для сільського населення. Коливання показника кількості населення, представленого у відсотках до попереднього року (винесено за допомогою додаткової осі Y), також має дуже узагальнений тренд до зменшення.

Міське і сільське населення істотно відрізняється за своєю кількістю. За даними [15] на 1 січня 1991 року в Україні мешкало 35,1 млн. (67,5 %) міського і 16,9 млн. (32,5 %) сільського населення, а на 1 січня 2022 року ці показники змінилися відповідно до 28,7 млн. (69,7 %) і 12,5 (30,3 %) – динаміка спів-

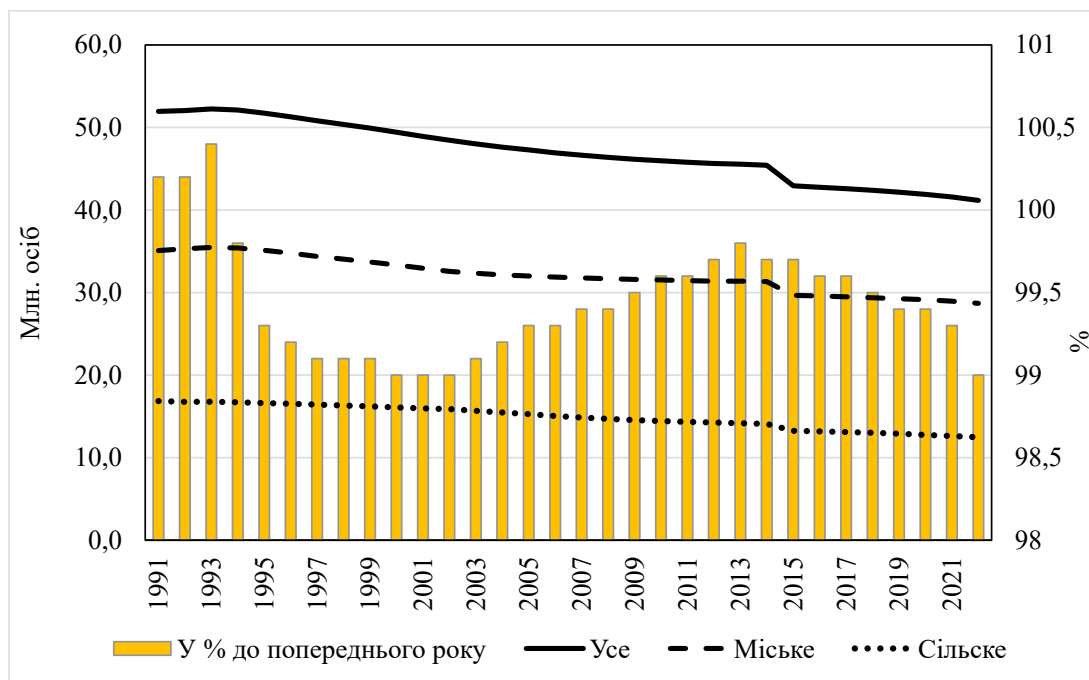


Рис. 1. Динаміка кількості наявного населення в Україні

відношення кількості міського і сільського населення представлена на рис. 2.

Спостерігається послідовна тенденція до зростання міського і зменшення сільського населення – це один з найважливіших критеріїв посилення такого явища як урбанізація. У останній рік періоду дослідження доля міського населення майже досягла 70 % (критерій виділення високоурбанізованих територій), після якого посилення урбанізації мало б помітно уповільнитися.

На рис. 3 представлена динаміка загального приросту (у цьому випадку – з 1991 по 2021 роки – це скорочення) населення з врахуванням таких його

складових як природний і міграційний приріст. І природний, і міграційний приріст населення істотно відрізняються за своїм внеском у формування загального приросту. Але особливості розподілу в часі дуже схожі – це максимуми значень обох складових у 1991-1992 роках і у 2012 році, а також мінімуми у 1994-2001 роках.

Міграційний приріст населення має позитивні значення у 1991-1993 роках і у період з 2005 по 2021 роки (хоча в останній період він мінімальний). Природний приріст населення протягом всього періоду 1991-2021 років фактично характеризується скороченням населення (хоча

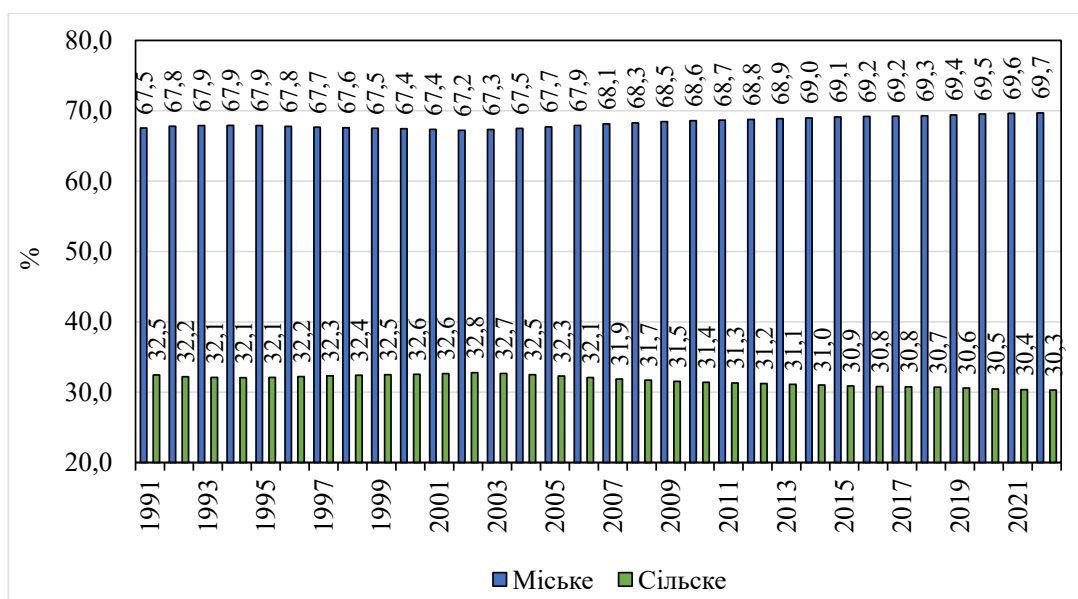


Рис. 2. Динаміка співвідношення кількості міського і сільського населення України, %

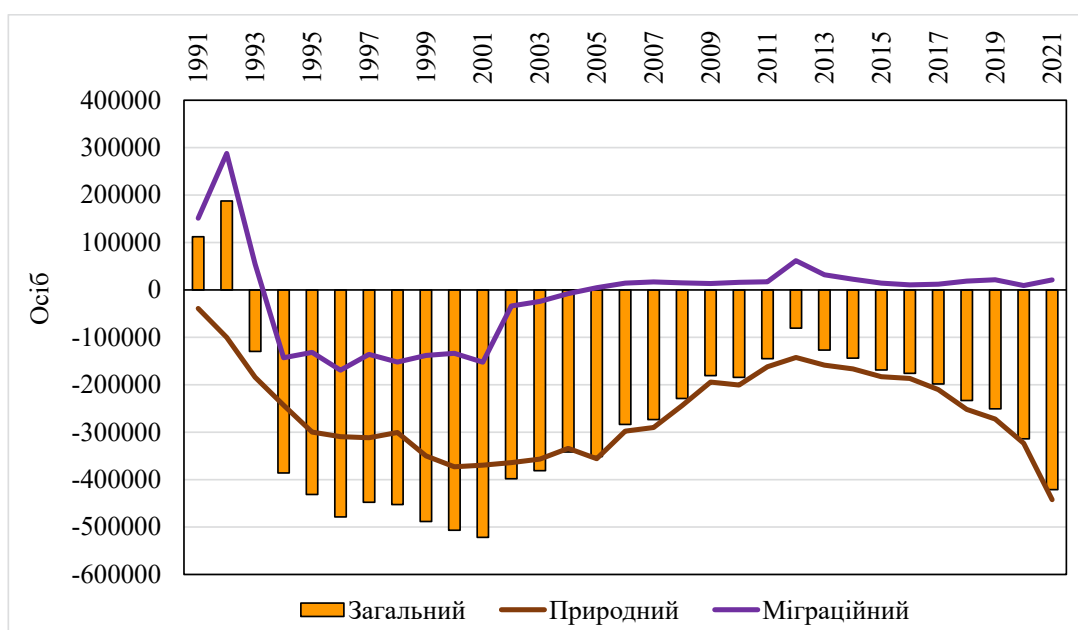


Рис. 3. Динаміка приросту населення України

спостерігалась тенденція і до скорочення, і до зростання).

На рис. 4 показано співвідношення внеску природного і міграційного приросту населення у загальні зміни кількості населення. Можна побачити, що визначальну роль міграційний приріст відігравав лише у 1991-1992 роках. Далі істотно переважав природний приріст населення (вище показано, що це не приріст, а скорочення). Отже можна побачити, що, починаючи з 2002 року і до кінця досліджуваного періоду, демографічні втрати населення визначаються переважно таким показником, як природний приріст населення, а внесок міграційного приросту населення у зміни кількості населення складає в окремі роки лише декілька відсотків.

Отже, природний приріст населення вносить значно більш істотний внесок у формування демографічних втрат населення, чим міграційний приріст. Тому саме природному приросту населення доцільніше приділити більшу увагу.

На рис. 5 представлена динаміка кількості природного приросту (скорочення) населення, а також таких його складових як кількість народжених і померлих. Показники кількості народжених і кількості померлих характеризуються певними коливаннями із загальним трендом до зменшення кожного з них. Природний приріст (скорочення) населення (представлений за допомогою додаткової осі У) характеризується досить вираженими коливаннями у часі на тлі постійних від'ємних значень. Найменший природний приріст населення (-442,3 тис. осіб) спостерігався у 2021 році.

На рис. 6 представлені значення показників народжуваності, смертності і природного приросту (зменшення) населення в регіонах України (у перерахунку на 1 тис. населення) на прикладі даних 2021 року, отриманих з [15].

За даними 2021 року народжуваність в областях України коливається у діапазоні від 5,2 (Сумська область) до 10,2 (Рівненській області) народжених на 1 тис. населення. Смертність значно вища за народжуваність – показник знаходиться в діапазоні значень від 14,8 осіб на 1 тис. населення (Закарпатська область) до 22,0 осіб на 1 тис. населення (Чернігівська область). Перевищення смертності над народжуваністю в областях України за даними 2021 року складало від 1,5 разів (Вінницька, Закарпатська, Рівненська області і м. Київ) до 4,0 разів (Чернігівська область), а в цілому по Україні цей показник дорівнює 2,5 рази. На матеріалах 2019-2021 років спостерігається стійке і виражене зростання такого перевищення у кожному з регіонів, включених в дослідження.

Найменші (найбільш істотні з точки зору демографічних втрат населення) значення природного приросту населення спостерігалися у Запорізькій (-15,8 осіб/1 тис.), Кіровоградській (-16,4 осіб/1 тис.), Харківській (-16,4 осіб/1 тис.) і Чернігівській (-16,4 осіб/1 тис.) областях.

Скорочення природного приросту населення, обумовлене зменшенням народжуваності і збільшенням смертності (це більш важлива складова) – є важливими факторами демографічних втрат населення.

На підставі цього висновку далі розглядалися ризики демографічних втрат, пов'язані із скорочен-

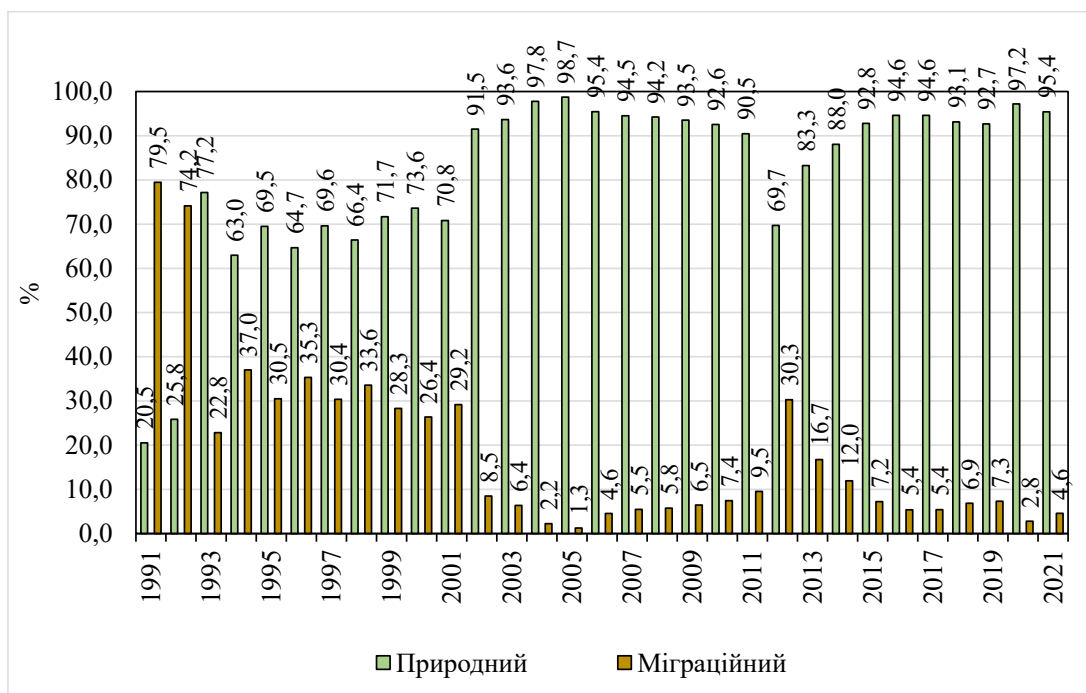


Рис. 4. Динаміка внеску природного і міграційного приросту населення у загальній зміні чисельності населення України

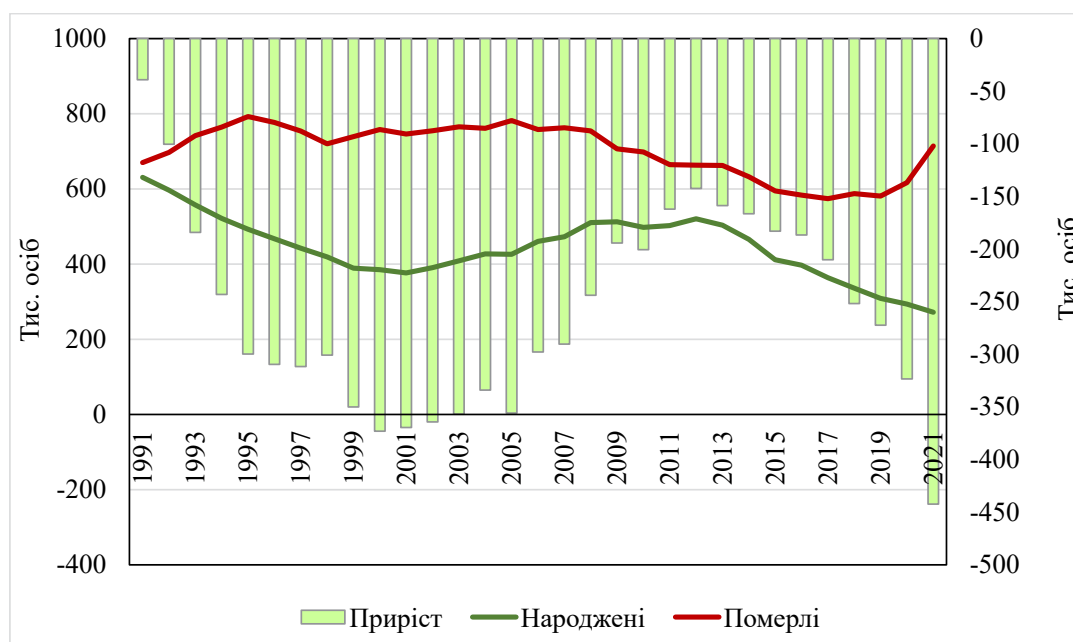


Рис. 5. Динаміка кількості народжених, померлих і природного приросту (скорочення) населення України

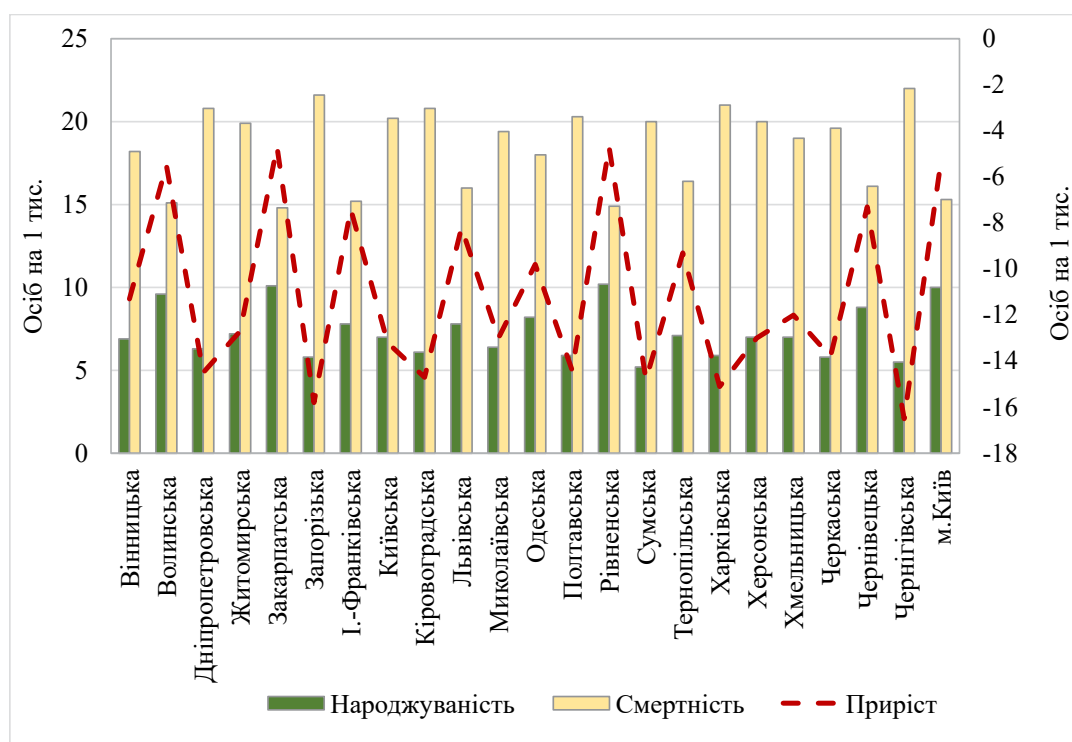


Рис. 6. Значення народжуваності, смертності і природного приросту (зменшення) населення в регіонах України за даними 2021 року

ням народжуваності, збільшенням смертності і зменшенням природного приросту населення (мається на увазі збільшення від'ємного значення показника).

Для цих трьох демографічних показників за даними 2019-2021 років (із застосуванням даних 2018 року) було розраховано різниці між значеннями поточного і попереднього років – це фактичні

зміни показника у поточному році у порівнянні із минулим роком, які характеризують покращання або погіршення ситуації. Розрахунок здійснювався для областей України і м. Київ (у розрахунку приймали участь регіони із інформацією, наявною у [13-15]). Трьохрічний період 2019-2021 років був застосований як мінімальний можливий період, який пропо-

нується для досліджень ризиків у галузі демографічної або медичної статистики, запропонований Н. Опополем.

Далі була здійснена спроба виявлення регіонів України, в яких значення змін показника перевищували припустиму межу (критичне значення спрощеного статистичного критерію $M_{кр}$, розраховане за формулою (1)). $M_{кр}$ розраховувалося для різниць значень між поточним і минулим роком. Розрахунки робилися окремо для народжуваності, смертності і природного приросту населення в кожен з 2019-2021 років окремо по регіонах України.

Були розраховані такі статистичні характеристики, як середнє значення і стандартне відхилення. Далі були виявлені райони, в яких зміни статистичних характеристик у порівнянні з попереднім роком перебільшують критичні значення. Такі області були виявлені тільки для даних 2021 року. Результати розрахунків статистичних характеристик і назви областей України з порушенням $M_{кр}$ за відповідним демографічним показником представлені у табл. 1 – це області, які слід вважати найбільш несприятливими з точки зору можливості демографічних втрат населення. Від'ємне значення середнього у цій таблиці вказує, що протягом періоду 2019-2021 років в областях України в середньому спостерігається зменшення відповідного показника у порівнянні із попереднім роком.

В табл. 1 можна побачити, що за зменшення природного приросту населення переважно відповідає показник смертності, а народжуваність має менше значення.

Далі значення зміни у порівнянні із попереднім роком для народжуваності, смертності і природного приросту населення апроксимувалися нормальним законом розподілу із параметрами (середнє і стандартне відхилення), представленими в табл. 1. На основі нормального закону з використанням його функції ймовірності розраховувалися значення ризиків (ймовірностей) відповідних змін народжуваності, смертності і природного приросту населення. Цей розрахунок був виконаний для даних 2021 року, в якому були виявлені відхилення від $M_{кр}$ для областей, вказаних у табл. 1.

Результати розрахунків ризиків представлені у табл. 2 (тут більш високі значення ризику відповідають високим значенням відповідних втрат).

Для візуалізації отриманих результатів була побудована карта ризиків демографічних втрат, обумовлених скороченням природного приросту населення. Карта представлена на рис. 7.

На цій карті виділено три зони. Перша з цих зон характеризується найменшими значеннями ризику демографічних втрат, обумовлених скороченням природного приросту населення (від 0,500 до 0,699) і знаходиться в західних областях України – це Волинська, Закарпатська, І.-Франківська, Львівська, Рівненська, Тернопільська і Чернівецька.

Друга зона – це середні за своїми значеннями ризики (0,700-0,899), що спостерігаються в областях центру і півночі України – це Вінницька, Житомирська, Полтавська, Сумська, Черкаська і Чернігівська області. Третя зона – це всі інші досліджені області, які переважно охоплюють південний схід України і характеризуються найвищими значеннями (0,900-1,000) ризику демографічних втрат, обумовлених скороченням природного приросту населення.

Три виділені зони досить добре відповідають умовному поділу території України за ступенем антропогенного перетворення ландшафтів, який збільшується з заходу у південно-східному напрямі [16]. Ситуація у Київській області і м. Київ, які територіально знаходяться ближче до другої зони, але характеризуються найбільш високими значеннями ризиків демографічних втрат (третя зона) не суперечать цій тенденції, оскільки мова йде про території дуже інтенсивного антропогенного освоєння. Що стосується Хмельницької області, яка територіально відноситься до регіонів Західної України, але також потрапила до зони з найвищими ризиками, то тут ситуація вимагає додаткових досліджень. Однак, в цілому, отримана картина вказує на безумовний внесок екологічної складової у формування демографічної ситуації в Україні.

Головні висновки і перспективи використання результатів дослідження. В Україні відбувалося повільне скорочення населення, як міського, так і сільського. Відсоток міського населення стало зростати і до початку 2022 року майже досяг 70 % – це одна з ознак високоурбанізованих територій.

Скорочення населення відбувалося переважно за рахунок скорочення природного приросту населення, міграційний приріст складав лише декілька

Таблиця 1

Статистичні характеристики змін значень демографічних показників у порівнянні із попереднім роком для областей України, а також області з порушенням критичного значення показника

Демографічний показник	Середнє	Стандартне відхилення	$M_{кр}$	Області, в яких порушено $M_{кр}$
Народжуваність	-0,5	0,25	-0,95	Київська
Смертність	1,2	1,20	3,50	Запорізька, Миколаївська, Харківська
Природний приріст	-1,6	1,15	-3,89	Запорізька, Миколаївська, Харківська

Таблиця 2

**Ризики демографічних втрат населення, обумовлені збільшенням смертності
і скороченням народжуваності та природного приросту населення**

Регіон	Народжуваність	Смертність	Природний приріст
Вінницька	0,655	0,662	0,728
Волинська	0,500	0,500	0,535
Дніпропетровська	0,345	0,960	0,966
Житомирська	0,345	0,820	0,831
Закарпатська	0,788	0,566	0,668
Запорізька	0,500	0,992	0,995
І.-Франківська	0,885	0,467	0,603
Київська	0,977	0,878	0,959
Кіровоградська	0,345	0,922	0,930
Львівська	0,655	0,599	0,668
Миколаївська	0,500	0,972	0,982
Одеська	0,500	0,960	0,972
Полтавська	0,345	0,861	0,871
Рівненська	0,345	0,566	0,569
Сумська	0,500	0,773	0,808
Тернопільська	0,500	0,467	0,500
Харківська	0,345	0,995	0,996
Херсонська	0,500	0,960	0,972
Хмельницька	0,885	0,820	0,904
Черкаська	0,212	0,773	0,757
Чернівецька	0,115	0,748	0,699
Чернігівська	0,500	0,798	0,831
м. Київ	0,212	0,943	0,941

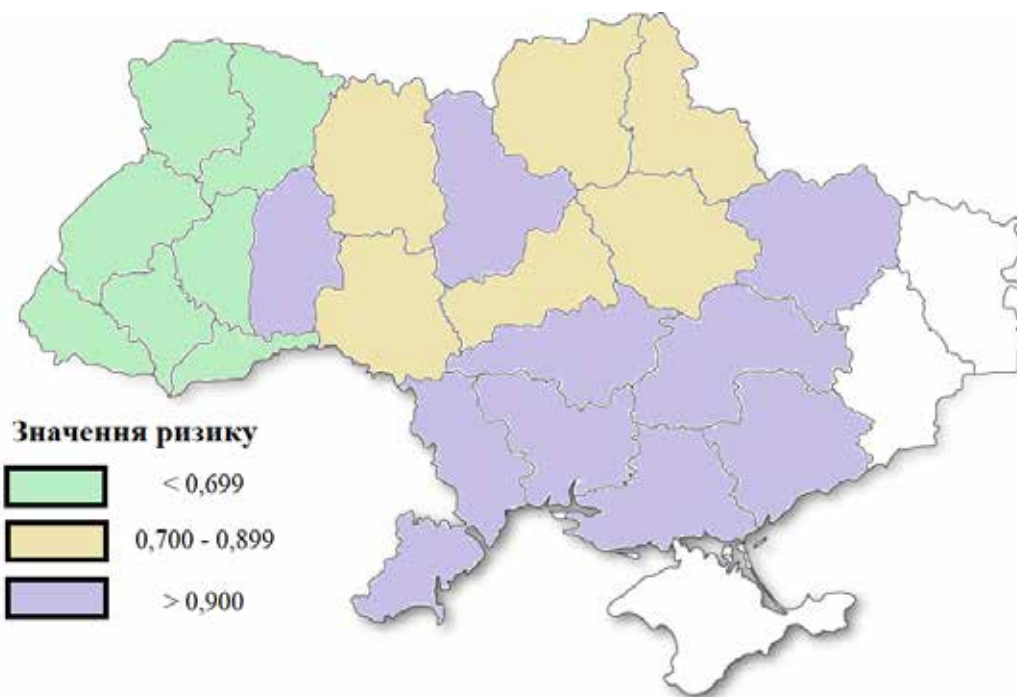


Рис. 7. Основні зони України за результатами визначення ризиків демографічних втрат, пов'язаних із скороченням природного приросту населення

відсотків від загальних змін населення. Тому, демографічне скорочення населення визначається переважно природним приростом, який в свою чергу залежить від народжуваності і смертності.

Зміни народжуваності, смертності і природного приросту населення характеризуються досить високими ризиками, найбільш несприятливі значення яких були зафіксовані у 2021 році і характеризувалися перевищенням критичних значень у Київській області (з народжуваності), а також в Запорізькій, Миколаївській і Харківській (зі смертності і природного приросту населення).

Територіальний розподіл ризиків, пов'язаних із скороченням природного приросту населення дуже чіткий і характеризується найнижчими значеннями в областях Західної України і найвищими – на південному сході. Він добре співпадає із ступенем антропогенного перетворення ландшафтів України, що підкреслює екологічну складову демографічних проблем держави.

Проведене дослідження показало складність демографічних проблем нашої країни і може бути використано для розробки планувально-рекомендаційних заходів для відтворення населення.

Література

1. Безпека життєдіяльності: навч. посіб. / Березуцький В.В., Васильковець Л.А., Вершиніна Н.П. та ін.; За ред. проф. В.В. Березуцького. Харків: Факт, 2005. 384 с.
2. Безпека життєдіяльності : підручник. / О.І. Запорожець, Б.Д. Халмурадов, В.І. Примсенко та ін. Київ : «Центр учбової літератури», 2013. 448 с.
3. Добровольський В.В. Екологічний ризик: причинно-наслідкові зв'язки в екосистемі. *Екологія. Наукові праці*. 2010. Том 132. Вип. 119. С. 6-9.
4. Добровольський В.В. Екологічна безпека і ризики: деякі понятійно-категоріальні уточнення. *Екологічна безпека*. № 1 (11) 2011. С. 17-20.
5. Кудрявицька К.М., Карабач К.С. Фактори ризику для здоров'я населення. *SWorldJournal*. 2021. Issue 10. Р. 52-55.
6. Феленчак Ю.Б. Ризики демографічних втрат: основні підходи, поняття та економічна суть. *Економічна теорія та економічна історія*. 2007. № 4(15). С. 391-403.
7. Феленчак Ю.Ю. Фактори формування ризиків демографічних втрат: класифікація та аналіз. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21.13. С. 314-320.
8. Феленчак Ю.Б., Шевчук Л.Т. Аналіз і оцінка ризику демографічних втрат: інноваційні підходи та методи (на матеріалах Львівської області). *Регіональна економіка*. 2009. № 1. С. 183-189.
9. Феленчак Ю.Б. Актуальні тенденції проходження демографічних процесів у Львівській області. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. Вип. 22.6. С. 382-390.
10. Fedorchenko V. Біостатистика та як її розуміти. URL: <https://ingeniusua.org/en/articles/biostatystyka-ta-yak-yiyi-rozumity> (дата звернення 23.06.2025)
11. Розанова В.А. Екологія людини: Конспект лекцій. Одеса : ТЭС, 2004. 112 с.
12. Іванчук М. А., Іванчук П. Р. Нормальний закон розподілу в медичних дослідженнях. *Медична інформатика та інженерія*. 2013. № 1. С. 48-52.
13. Населення України 2019. Демографічний щорічник. Державна служба статистики України (офіційний портал). Київ : 2020. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/13/Arch_nasel_zb.htm (дата звернення 8.07.2025)
14. Населення України 2020. Демографічний щорічник. Державна служба статистики України (офіційний портал). Київ : 2021. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/Arhiv_u/13/Arch_nasel_zb.htm (дата звернення 8.07.2025)
15. Населення України 2021. Демографічний щорічник. Державна служба статистики України (офіційний портал). Київ : 2022. URL: <https://stat.gov.ua/sites/default/files/2023-10/%D0%94%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D1%84%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D1%89%D0%BE%D1%80%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%BA%20%27%D0%9D%D0%B0%D1%81%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8%27.pdf> (дата звернення 20.06.2025)
16. Гавриленко О.П. Екогеографія України : навч. посіб. Київ : Знання, 2008. 646 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 16.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

СТАН ҐРУНТОВИХ РЕСУРСІВ ЖИТОМИРЩИНИ В КОНТЕКСТІ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

Герасимчук О.Л., Кагукіна А.М., Шевчук Л.М., Підвисоцький В.Т.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
ke_kham@ztu.edu.ua

Актуальність вивчення питання, що стосується стану ґрунтових ресурсів в умовах кліматичних змін зростає щороку. Питання збереження та раціонального використання земельних ресурсів набуває вагомого значення для забезпечення сталого розвитку регіонів, особливо в сучасних умовах зростаючого антропогенного навантаження на навколишнє середовище та посилення кліматичних флуктуацій. Особливість проблеми полягає в тому, що несприятливі кліматичні зміни накладаються на вже існуючі процеси деградації ґрунтів, спричинені нераціональним землекористуванням, і це створює кумулятивний негативний ефект, який потребує комплексного аналізу та розробки інтегрованих заходів щодо адаптації сільськогосподарського виробництва до нових умов. Здійснено аналіз стану ґрунтового покриву Житомирщини, який характеризується значною різноманітністю через географічне розташування території на стику природно-кліматичних зон. Найбільші площі ерозійно-небезпечних ґрунтів зони Полісся складають дефляційно небезпечні ґрунти 154,2 га та ерозійно небезпечні ґрунти 178,2 га. Інші категорії мають значно менші показники, а саме ґрунти, розташовані на схилах 24 га, після вітрової ерозії 16,3 га, слабозмиті 12,5 га, після водної ерозії 7,6 га, слабозмиті 4 га, середньозмиті 2 га, сильнозмиті 1,6 га та середньозмиті 3,1 га. Площа деградованих земель у регіоні постійно збільшується, що створює серйозні загрози для аграрного сектору економіки. Консолідація зусиль науковців, фермерів та державних установ є ключовою для збереження родючості українських ґрунтів в умовах змін клімату. Для утримання ґрунтового ресурсу потрібно впроваджувати інтегровані стратегії адаптації, зокрема: запровадження ґрунтозахисних технологій, заліснення деградованих ділянок, оптимізацію сівозмін та моніторинг змін ґрунтового середовища. *Ключові слова:* кліматичні зміни, ґрунтові ресурси, деградація ґрунтів, зміна клімату, ґрунти.

The state of soil resources in the zhytomyr region in the context of climate change. Herasymchuk O., Kagukina A.

The relevance of studying the issue of soil resources in the context of climate change is growing every year. The issue of conservation and rational use of land resources is becoming increasingly important for ensuring sustainable development of regions, especially in the current conditions of growing anthropogenic pressure on the environment and intensified climate fluctuations. The problem is particularly acute because adverse climate change is superimposed on existing soil degradation processes caused by unsustainable land use, which creates a cumulative negative effect that requires a comprehensive analysis and development of integrated measures to adapt agricultural production to new conditions. A analysis of the state of the soil cover of Zhytomyr region, which is characterised by considerable diversity due to the geographical location of the territory at the junction of natural and climatic zones, was carried out. The largest areas of erosion-hazardous soils in the Polissia zone are deflationary soils (154.2 hectares) and erosion-hazardous soils (178.2 hectares). Other categories have much lower figures, namely soils located on slopes of 24 hectares, after wind erosion of 16.3 hectares, slightly washed away of 12.5 hectares, after water erosion of 7.6 hectares, slightly washed away of 4 hectares, medium washed away of 2 hectares, heavily washed away of 1.6 hectares and medium washed away of 3.1 hectares. The area of degraded land in the region is constantly increasing, which poses serious threats to the agricultural sector. Consolidating the efforts of scientists, farmers and government agencies is key to preserving the fertility of Ukrainian soils in the face of climate change. To maintain the soil resource, integrated adaptation strategies need to be implemented, including the introduction of soil protection technologies, reforestation of degraded areas, optimisation of crop rotations and monitoring of changes in the soil environment. *Key words:* climate change, soil resources, soil degradation, climate change, soils.

Постановка проблеми. Ґрунти вразливі до змін температурного режиму, зменшення або збільшення кількості опадів, екстремальних погодних явищ. Ці фактори спричиняють ерозію, засолення, втрату органічної речовини та біологічної активності ґрунтів. Наслідком є зниження врожайності, погіршення якості продукції та загроза продовольчій безпеці [1]. Однак, попри значну увагу до зміни клімату загалом, питання впливу на ґрунтові ресурси все ще недостатньо досліджене в контексті адаптації до нових умов. Зміна клімату призводить до системних трансформацій у функціонуванні ґрунтів як основного компо-

нента наземних екосистем. В умовах Житомирської області, яка характеризується різноманітністю природно-кліматичних зон, вплив кліматичних змін на ґрунти має особливо виражений характер через наявність різних типів ґрунтового покриву – від дерново-підзолистих ґрунтів Полісся до чорноземів Лісостепу. Особливість проблеми полягає в тому, що несприятливі кліматичні зміни накладаються на вже існуючі процеси деградації ґрунтів, спричинені нераціональним землекористуванням, і це створює кумулятивний негативний ефект, який потребує комплексного аналізу та розробки інтегрованих заходів щодо

адаптації сільськогосподарського виробництва до нових умов.

Актуальність дослідження впливу змін клімату на стан ґрунтових ресурсів Житомирської області зумовлена рядом вагомих факторів. Спостерігається пришвидшення темпів кліматичних змін, що проявляється у зростанні середньорічних температур, перерозподілі опадів протягом року та збільшенні частоти екстремальних погодних явищ. Особливої уваги потребує вивчення впливу кліматичних змін на ґрунтовий покрив Житомирської області через її унікальне розташування на межі двох природно-кліматичних зон – Полісся та Лісостепу, що зумовлює наявність різноманітних типів ґрунтів з різною стійкістю до кліматичних впливів [2]. Сільське господарство регіону має стратегічне значення для продовольчої безпеки країни, а деградація ґрунтів може призвести до суттєвого зниження врожайності ключових сільськогосподарських культур і погіршення їх якості. Ґрунти відіграють вирішальну роль у балансі вуглецю та є ключовим фактором пом'якшення наслідків зміни клімату. Втрата органічної речовини ґрунту призводить до додаткових викидів CO₂ в атмосферу, що посилює парниковий ефект [3]. Саме тому розробка ефективних стратегій управління ґрунтовими ресурсами в умовах змін клімату має не лише регіональне, але й глобальне значення. Відсутність комплексного аналізу впливу кліматичних змін на різні типи ґрунтів Житомирської області та недостатня розробленість науково обґрунтованих рекомендацій щодо адаптації земельних ресурсів до нових кліматичних умов зумовлюють необхідність проведення системних досліджень у цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що кліматичні зміни вже призвели до підвищення частоти та інтенсивності ґрунтової ерозії внаслідок сильних злив, деградації ґрунтів через зниження рівня ґрунтової вологості, змін у структурі мікрофлори, що впливає на родючість та збільшення потреб у добривах, зрошенні та адаптивних агротехнологіях. Глобальне потепління сприяє збільшенню ерозії ґрунтів. Зміни у використанні земель, такі як вирубка лісів та розширення сільськогосподарських угідь, посилюють цей ефект. Однак впровадження заходів з охорони ґрунтів, таких як відновлення лісів та зміна сільськогосподарських практик, може повністю компенсувати негативний вплив зміни клімату на ерозію [4].

Кліматичні зміни впливають на ґрунтові мікроорганізми, які відіграють ключову роль у кругообігу поживних речовин. Підвищення температури та зміни вологості можуть змінити склад мікробіомів, що вплине на родючість ґрунтів та їх здатність до секвестрації вуглецю. Дослідження показують, що грибові спільноти менш стійкі до посухи та тепла порівняно з бактеріальними, що може призвести до зниження функціональності ґрунтів [5].

Зміна клімату призводить до змін у гідрологічному режимі ґрунтів, зокрема до зменшення вмісту вологи та збільшення частоти посух. Це впливає на здатність ґрунтів утримувати воду, що, в свою чергу, впливає на врожайність та стабільність агроєкосистем. Дослідження в Центральній Азії показали, що підвищення температури та зміни в кількості опадів мають прямий вплив на ерозію ґрунтів та інші екосистемні послуги [6]. Деградація ґрунтів через інтенсивне землеробство та зміну клімату загрожує продовольчій безпеці. У Великобританії понад 40% сільськогосподарських ґрунтів деградовані, що знижує їх здатність утримувати воду та вуглець, посилюючи наслідки посух та повеней. Це також призводить до зростання цін на продукти харчування та зниження врожайності [7].

Викладення основного матеріалу. Територія Житомирської області характеризується хвилястою рівнинною поверхнею з поступовим зниженням у напрямку півночі та північного сходу – з висот 280-220 метрів до менш ніж 150 метрів над рівнем моря. Ґрунтовий покрив формується під впливом геологічної структури Українського кристалічного щита, переважно рівнинного рельєфу, а також через процеси, пов'язані з льодовиковими і водно-льодовиковими відкладами південно-польського та дніпровського зледеніння і четвертинними антропогенними відкладеннями. Через близьке залягання кристалічних порід розвиваються заболочення, які уповільнюють ґрунтоутворення, сприяючи формуванню торфовищ і торф'яно-болотних ґрунтів. На підвищеннях і ділянках з потужним шаром льодовикових відкладів переважають дерново-підзолисті піщані та супіщані ґрунти з кислою реакцією. Найродючіші ґрунти зосереджені на півдні області. Поширені сірі та темно-сірі опідзолені ґрунти, а також чорноземи: опідзолені (119,3 тис. га), типові (205,6 тис. га), лучні й чорноземно-лучні (35,8 тис. га), а також дерново-глейові (21,5 тис. га). Загальна площа земель з високою природною родючістю становить близько 232 тис. га. Площа сільськогосподарських угідь – 1510,1 тис. га, що відповідає 50,6% загальної території області. Однак, на сьогодні стан ґрунтів в аграрному користуванні викликає занепокоєння. Широко розповсюдженими є явища ерозії, зниження вмісту гумусу, засолення, підкислення та ущільнення ґрунтів [8].

Ґрунтовий покрив Житомирської області зазнає значного впливу глобальних кліматичних змін [9; 10], які модифікують природні процеси ґрунтоутворення та посилюють існуючі деградаційні явища. Зміна температурного режиму суттєво впливає на біологічну активність ґрунтів.

Вплив змін клімату на ґрунтовий покрив Житомирської області має виражені регіональні особливості, зумовлені різноманітністю ґрунтових умов. В **Поліській зоні (північна частина області)** домінуючими типами ґрунтів є дерново-підзолисті

піщані та супіщані, торфово-болотні та лучні. Таким чином, вплив кліматичних змін має свої особливості. Підвищення температури в поєднанні зі зменшенням літніх опадів призводить до прискореного розкладу органічної речовини торфових ґрунтів, що супроводжується вивільненням значної кількості CO_2 в атмосферу. Зниження рівня ґрунтових вод внаслідок тривалих посушливих періодів спричиняє пересихання верхніх горизонтів торфових ґрунтів, підвищуючи ризик їх займання. Збільшення кількості зимових опадів посилює процеси вимивання поживних речовин з легких за гранулометричним складом дерново-підзолистих ґрунтів, прискорюючи їх підкислення. Зростання частоти сильних злив у літній період на легких ґрунтах Полісся посилює водну ерозію, особливо на схилових землях.

В Лісостеповій зоні (південна частина області) домінуючими типами ґрунтів є чорноземи опідзолені, типові, сірі та темно-сірі лісові. В таких умовах підвищення температури повітря та зниження кількості літніх опадів призводить до погіршення вологозабезпеченості чорноземів, зменшення їх біологічної активності та уповільнення процесів гумуоутворення. Посилення інтенсивності опадів при загальному зменшенні їх кількості в теплий період року підвищує ризик водної ерозії, особливо на схилових землях. Зростання частоти екстремальних погодних явищ (злив, посух) призводить до руйнування структури ґрунту, його ущільнення та погіршення водно-повітряного режиму. Зниження рівня ґрунтових вод спричиняє дегуміфікацію та деградацію чорноземів, особливо в умовах інтенсивного сільськогосподарського використання.

Режим зволоження в Житомирській області демонструє зміни, які безпосередньо впливають на ґрунтові процеси. За період 2015–2023 років відзначається зміни в розподілі кількості опадів (Рис. 1). Збільшення кількості опадів відбувається переважно за рахунок зимового періоду та короткочасних інтенсивних літніх злив, тоді як тривалість посушливих періодів у весняно-літній сезон також зросла [12]. Такі зміни мають суттєвий вплив на водний режим ґрунтів. Збільшення частоти та інтенсивності злив призводить до зростання поверхневого стоку та посилення водної ерозії, особливо на схилових землях Лісостепу. Підвищення температури повітря супроводжується зростанням випаровування з поверхні ґрунту, що призводить до пришвидшеного висушування верхнього шару та формування ґрунтової кірки. Збільшення нерівномірності опадів спричиняє чергування періодів перезволоження та пересихання ґрунту, що негативно впливає на його структуру та біологічну активність. Зростання зимових температур та збільшення кількості відлиг призводить до нестабільного снігового покриву, що знижує захисну функцію снігу та сприяє промерзанню ґрунту під час повернення холодів.

Поєднання природних та господарських чинників, зокрема інтенсивне сільськогосподарське використання земель, сприяє розвитку ерозійних процесів. Найбільше ерозійно нестійких земель зосереджено в Бердичівському районі: у межах Ружинської селищної ради – 32%, Любарської – 26%, Попільнянської, Корнинської, Андрушківської та Квітневої – по 16%. Загалом, на схилах з ухилом понад 5° розташовано 21,3 тис. га ріллі, з них 6,7 тис. га – на схилах понад 7° . У середньому в межах Лісостепу частка середньо- та сильно змитих земель становить близько 13%. Загальна площа деградованих земель у Житомирській області перевищує 460 тис. га. З них заболочених – 284,9 тис. га, перезвожених – 79,2 тис. га, підданих вітровій ерозії – 27 тис. га, а водній – 68,9 тис. га, з яких 23,5 тис. га є середньо або сильно змитими. Динаміка вмісту гумусу в ґрунтах свідчить про поступову деградацію. Найвищі показники були зафіксовані у 1966–1970 роках, але вже з 1980-х років розпочалося його зниження, що триває досі. В результаті, у порівнянні з вихідними показниками, вміст гумусу скоротився: на Поліссі – у 1,27 раза, у Лісостепу – у 1,17 раза, загалом по області – у 1,2 раза. Якісний стан ґрунтів області, особливо на землях сільськогосподарського призначення, продовжує погіршуватися під впливом переважно антропогенних факторів. Зокрема, негативну роль відіграє вирощування культур, не пристосованих до місцевих умов, таких як соняшник чи кукурудза, на малородючих піщаних ґрунтах Полісся [8].

У Житомирській області площа сільськогосподарських угідь, розміщених на схилах, перевищує 63 тис. га. З них близько 66 % припадає на пологі схили, приблизно 30 % – на середньої крутизни схили з ухилом $3\text{--}5^\circ$, а ще 14 % – на круті ділянки з нахилом понад 7° . На пологих схилах переважає площинна форма водної ерозії, яка відбувається поступово та часто непомітно на ранніх етапах. У процесі змиву з поверхні ґрунту виносяться дрібні агрегати, пов'язані з гумусовими речовинами, що призводить до втрати структурної стійкості, підвищення розпиленості й утворення корки. З часом змивається родючий шар і оголюється підорний горизонт, що візуально проявляється у світлішому забарвленні ґрунту. Інтенсивність ерозійних процесів тісно пов'язана з характером використання земель. Відсутність раціональної організації території та недотримання ґрунтозахисних технологій при вирощуванні сільськогосподарських культур особливо прискорюють розвиток ерозії на крутих схилах, сприяючи формуванню ярів і балок, а також втраті продуктивних орних площ. Щоб уникнути подальшого змиву, землі з ухилом понад 5° рекомендується виводити з інтенсивного обробітку та переводити під багаторічні трави або заліснювати. На Поліссі процеси водної ерозії мають менш виражений характер, що зумовлено переважно рівнинним рельєфом і незначною крутизною схи-

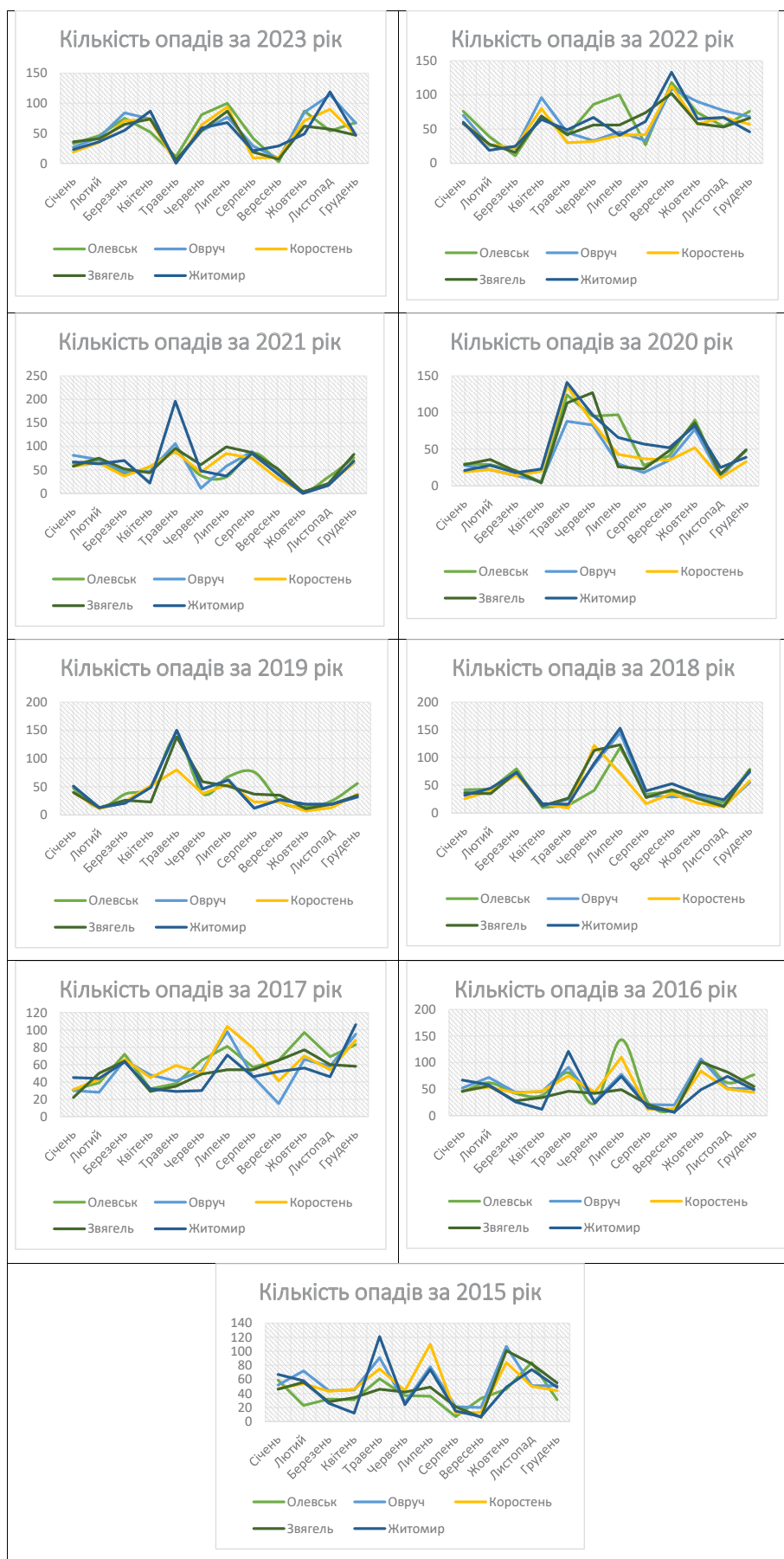


Рис. 1. Кількість опадів в містах Житомирської області за 2015 – 2023 рр. [8; 11]

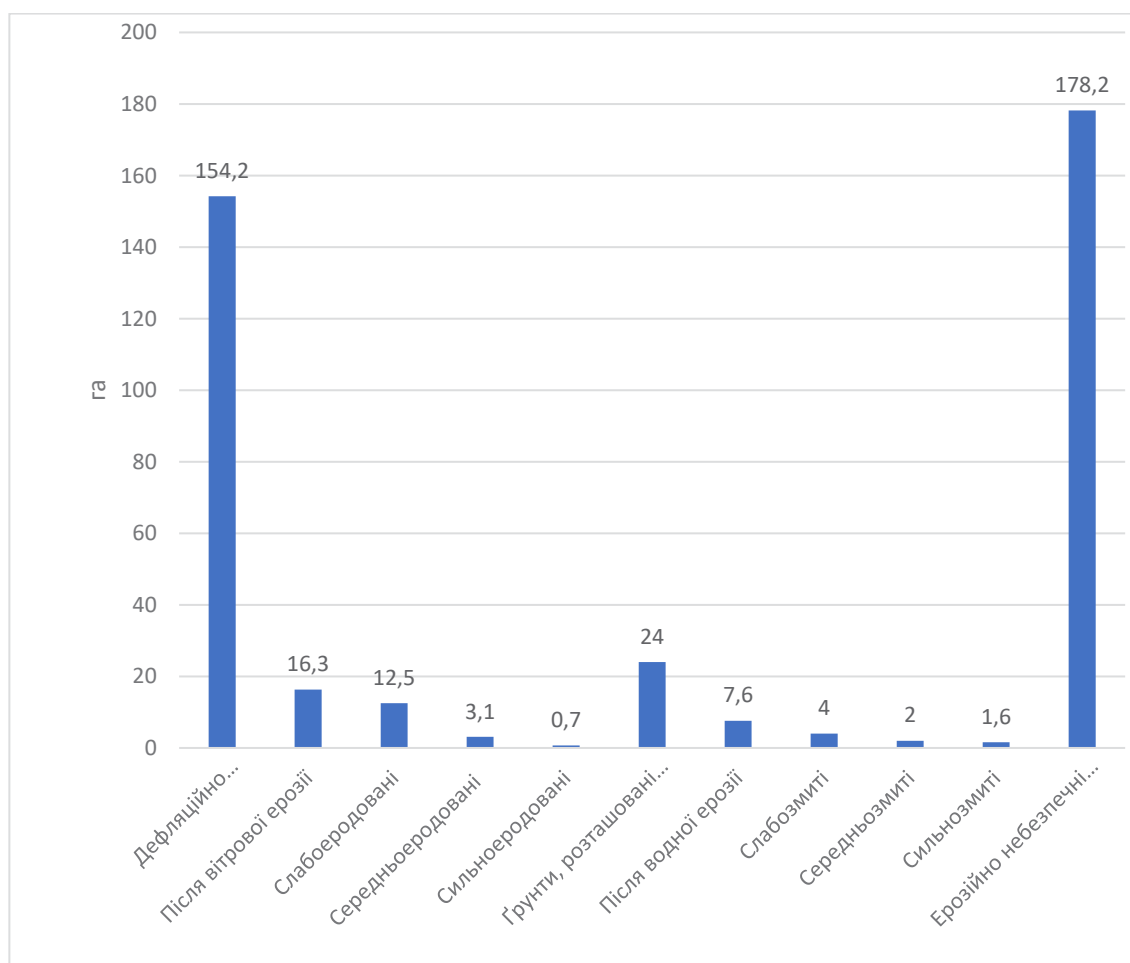


Рис. 2. Площа ерозійно-небезпечних ґрунтів зони Полісся [8]

лів. Винятком є території Словечансько-Овруцького кряжу в межах Коростенського району та окремі височини Житомирського району, де ерозійні процеси більш помітні [8].

Найбільші площі ерозійно-небезпечних ґрунтів зони Полісся (Рис. 2.) займають дефляційно небезпечні ґрунти 154,2 га та ерозійно небезпечні ґрунти 178,2 га. Інші категорії мають значно менші показники, а саме ґрунти, розташовані на схилах (24 га), після вітрової ерозії (16,3 га), слабовимиті (12,5 га), після водної ерозії (7,6 га), слабовимиті (4 га), середньозмиті (2 га), сильнозмиті (1,6 га) та середньозмиті (3,1 га). Найменшу площу займають сильнозмиті ґрунти (0,7 га). Аналіз даних свідчить про критичну ситуацію з ерозійними процесами у зоні Полісся. Загальна площа ерозійно- та дефляційно-небезпечних ґрунтів складає понад 300 га, що вказує на значну вразливість земель регіону до різних типів деградації. Переважання дефляційно та ерозійно небезпечних ґрунтів свідчить про високий потенціал розвитку подальших деградаційних процесів, якщо не будуть вжиті відповідні захисні заходи.

В таких умовах слід впровадити комплексну систему протиерозійних заходів, спрямованих на

захист ґрунтів від вітрової та водної ерозії, розширити площі контурно-меліоративного землеробства з використанням ґрунтозахисних технологій обробітку, збільшити площі лісових насаджень та полезахисних лісосмуг для зменшення впливу вітрової ерозії, створити буферні зони вздовж водних об'єктів для зменшення водної ерозії, впровадити науково обґрунтовані сівозміни з використанням сидеральних культур та багаторічних трав.

Також є необхідність проводити регулярний моніторинг стану ґрунтів для своєчасного виявлення та запобігання розвитку ерозійних процесів, розробити та впровадити регіональну програму стимулювання землекористувачів до застосування ґрунтозахисних технологій та використовувати агротехнічні прийоми, що сприяють накопиченню та утриманню вологи в ґрунті і підвищують його стійкість до ерозійних процесів.

В умовах зміни клімату, слід адаптувати структуру посівних площ відповідно до змін кліматичних умов, надаючи перевагу посухостійким та терmostійким культурам, що здатні формувати потужну кореневу систему, впроваджувати системи крапельного зрошення та мікрозрошення для раціонального

використання водних ресурсів в умовах підвищення середньорічних температур, застосовувати мульчування ґрунту рослинними рештками для зменшення випаровування вологи та захисту від екстремальних температур.

Головні висновки. Для збереження ґрунтового ресурсу необхідно запроваджувати інтегровані стратегії адаптації, зокрема: впровадження

ґрунтозахисних технологій, заліснення деградованих земель, оптимізацію сівозмін та моніторинг змін ґрунтового середовища. Актуальність дослідження цього питання зростає з кожним роком, тому консолідація зусиль науковців, фермерів та урядових структур є ключовою для збереження родючості українських ґрунтів в умовах змін клімату.

Література

1. Герасимчук О.Л., Мельник-Шамрай В.В., Шевчук Л.М., Васільєва Л.А. Інноваційні підходи до розвитку землеустрою в контексті сталого розвитку територій. *Екологічні науки* № 4(55). 2024 С. 202-206. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.есо.4-55.33>
2. Герасимчук, О., Гой, В., Харів, В. Використання сучасних геодезичних технологій для проведення оцінки земельних ресурсів у віддалених районах.. *Технічні науки та технології*. 2024. (4 (38), С. 313–324. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4\(38\)-313-324](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2024-4(38)-313-324)
3. Kahukina A., Patseva I. Assessment and forecast of atmospheric pollutant dynamics in the urban ecosystem of Zhytomyr. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. № 2(3(82)). P. 36–42. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.32689>
4. Joris P.C. Eekhout, Joris de Vente. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth-Science Reviews*. Volume 226, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921>
5. Boyle, Julia A., Bridget K. Murphy, Ingo Ensminger, John R. Stinchcombe, Megan E. Frederickson. Resistance and Resilience of Soil Microbiomes under Climate Change.” *Ecosphere*. 2024. 15(12): e70077. <https://doi.org/10.1002/ecs2.70077>.
6. Jiangyue Li, Hongxing Chen, Chi Zhang. Impacts of climate change on key soil ecosystem services and interactions in Central Asia. *Ecological Indicators*. 2020. Volume 116. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106490>
7. European and British soils seriously degraded by intensive farming. URL: <https://surl.li/qzwwmj> (дата звернення: 14.05.2025).]
8. Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні. URL: <http://surl.li/hfgsf> (дата звернення: 15.05.2025)
9. Пацева І.Г., Кагукіна А.М., Луньова О.В. Тенденції зміни клімату Житомирщини. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 6(51). С. 156-159.
10. Пацева І.В., Кагукіна А.М. Адаптація до зміни клімату міста Житомир. Проблеми хімії та сталого розвитку. 2023. Вип. 3. С. 66-72.
11. Статистика погоди. Кліматичні дані за роками та місяцями. *Метеонорм* URL: https://meteopost.com/weather/climate/#google_vignette (дата звернення: 1.05.2025).
12. Пацева І.Г., Кагукіна А.М. Коефіцієнти суттєвості відхилень середньомісячних показників температури повітря та кількості опадів в місті Житомир. *Екологічні науки*. 2024. Вип. 2(53). С. 238-242.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЗАГАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

УДК 502/504+502.3/.7

ОГЛЯД МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ПОВІТРЯНИЙ БАСЕЙН

Чугай А.В., Шапочка М.О.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова
вул. Змієнка Всеволода, 2, 65082, м. Одеса
avchugai@ukr.net

Вплив стаціонарних і пересувних джерел забруднення, ведення бойових дій на території України формують сумарне техногенне навантаження на повітряний басейн. Проблема формування високих рівнів навантаження є особливо гострою для урбанізованих територій. Важливим фактором є вибір методики, яка найкраще відповідає вихідним умовам і задачам дослідження. Мінімізація техногенного навантаження на складові довкілля, в тому числі і на повітряний басейн, є однією з основних передумов забезпечення сталого розвитку в регіонах України. На сьогодні в Україні не існує єдиного підходу для вирішення подібних задач. Методики, які використовуються для оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн, значно різняться. Для оцінки використовуються різні показники, параметри та оціночні шкали. У роботі виконана спроба апробації оцінки рівня техногенного навантаження на повітряний басейн на основі розрахунку показника небезпечності структури викидів для міст Одеської області по чотирьох основних забруднюючих речовинах. Для більшості міст Одеської області найбільшу небезпеку справляють викиди NO_2 . З урахуванням класу небезпеки забруднюючих речовин мінімальна небезпека відзначається по викидах CO , який відноситься до 4 класу небезпеки. На основі отриманих даних запропоновано градації показника небезпечності структури викидів по трьох групах. У переважній більшості всі міста Одеської області можна віднести до 1-ої і 2-ої груп. Визначено, що важливою складовою є саме внесок окремої забруднюючої речовини у загальні показники обсягів викидів (отримані високі показники небезпечності структури викидів у деяких містах області порівняно з обласним центром). Для більш детальної оцінки необхідно мати повну інформацію щодо структури викидів у населених пунктах, що може у подальшому бути основою для розробки ефективних природоохоронних заходів щодо поліпшення стану атмосферного повітря в регіонах. *Ключові слова:* повітряний басейн, техногенне навантаження, методи оцінки, небезпека структури викидів.

Review of methodological approaches to assessing the technogenic load on the air basin. Chugai A., Shapochka M.

The impact of stationary and mobile sources of pollution and military operations on the territory of Ukraine form the total technogenic load on the air basin. The problem of high levels of load is particularly important for urbanized areas. An important factor is the choice of a methodology that best suits the initial conditions and objectives of the study. Minimizing the technogenic load on the environment, including the air basin, is one of the main prerequisites for sustainable development in the regions of Ukraine. Today, there is no single approach to solving such problems in Ukraine. Methods used to assess the technogenic load on the air basin vary considerably. Different indicators, parameters, and evaluation scales are used for the assessment. The article presents an attempt to test the assessment of the level of technogenic load on the air basin based on the calculation of the hazardousness index of the emission structure for the cities of Odesa region for four main pollutants. For most cities of Odesa oblast, NO_2 emissions pose the greatest danger. Taking into account the hazard class of pollutants, the minimum hazard is observed for CO emissions, which belongs to the 4th hazard class. Based on the data obtained, we propose gradations of the hazardousness indicator of the emission structure into three groups. In the vast majority of cases, all cities in Odesa region can be attributed to groups 1 and 2. It is determined that an important component is the contribution of a particular pollutant to the total emissions (high indicators of the hazardousness of the emissions structure in some cities of the region compared to the regional center). In order to make a more detailed assessment, it is necessary to have complete information on the structure of emissions in settlements, which can then serve as a basis for developing effective environmental measures to improve the state of the air in the regions. *Key words:* air basin, technogenic load, assessment methods, hazard of emission structure.

Постановка проблеми. Атмосферне повітря є невичерпним природним ресурсом, якість якого суттєво впливає на здоров'я населення. На формування рівня забруднення повітря, впливають, які відомо, дві основні групи джерел викидів – стаціонарні і пересувні. З початком повномасштабних військових дій в Україні суттєвим додатковим дже-

релом впливу є ведення бойових дій. Всі перелічені фактори формують сумарне техногенне навантаження на повітряний басейн.

Актуальність дослідження. Оцінка рівня техногенного навантаження на повітряний басейн є важливою задачею сучасності. Результати оцінки можуть бути використані як основа для розробки

низки природоохоронних заходів, спрямованих на поліпшення стану довкілля, в тому числі і повітряного басейну. Проблема формування високих рівнів навантаження є особливо гострою для урбанізованих територій. Для ефективної оцінки також важливим є вибір методики, яка найкраще відповідає вихідним умовам і задачам дослідження.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Відповідно до «Стратегії сталого розвитку України до 2030 року. Проект – 2017» [1], Указу Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» [2], однією з основних передумов забезпечення сталого розвитку в регіонах України є підтримання довкілля в належному стані з метою забезпечення якісного життя та благополуччя теперішнього і майбутніх поколінь. Виконання даного завдання можливе лише шляхом мінімізації техногенного навантаження на складові довкілля, в тому числі і на повітряний басейн.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн та їх практичне застосування є безпосередньо предметом наукових досліджень авторів. У науковій і методичній літературі зустрічається значна кількість робіт, присвячених аналізу і оцінці техногенного впливу на повітряний басейн різних регіонів України. Перелік методик, які використовуються, значно різняться. Так, у навчальному виданні [3] запропоновано для оцінки техногенного навантаження використовувати дві групи індикаторів – деструктивної і конструктивної дії, тобто саме показники впливу і заходи щодо зниження впливу. Також одним з відомих показників оцінки є коефіцієнт небезпеки підприємства (КНП), який дозволяє виконати оцінку як для одного підприємства, так і отримати узагальнені результати по місту в цілому [4]. Автором роботи запропоновано розраховувати модуль техногенного навантаження на повітряний басейн ($M_{\text{пб}}$) [5]. У роботі [6] авторами запропоновано комплексний показник для оцінки екологічної безпеки підприємств. Складовою показника є інтегральний коефіцієнт екологічної шкоди, який відображає умовну середню екологічну шкоду довкіллю від господарської діяльності підприємства і враховує показники викидів забруднюючих речовин (ЗР), або скидів ЗР, або утворення відходів. У роботі [7] виконано оцінку техногенного навантаження на певну територію за трьома показниками, серед яких один показник – це щільність викидів ЗР в атмосферне повітря. Також важливою складовою для багатьох регіонів є оцінка впливу транспортних систем на стан атмосферного повітря. Подібний аналіз виконаний у роботі [8] на прикладі Полтавської області.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Наведено огляд методичних підходів до оцінки рівня техногенного навантаження на пові-

тряний басейн. На сьогодні в Україні не існує єдиного підходу для вирішення подібних задач. Кожен з розглянутих методів використовує різні показники, параметри та оціночні шкали.

Методологічне або загальнонаукове значення. Виконана спроба апробації оцінки рівня техногенного навантаження на повітряний басейн на основі розрахунку показника небезпечності структури викидів (НСВ) для міст Одеської області, запропонованого у роботі [9]. Показник розглядається як додатковий для проведення комплексної оцінки техногенного впливу від стаціонарних джерел. Розраховується за формулою:

$$\text{НСВ} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{q_i}{\text{ГДКС}_{\text{д}_i}} \right)^{\alpha_i}, \quad (1)$$

де q_i – обсяг викиду i -ої речовини, т, який чисельно дорівнює значенню її

частки у структурі викидів (сума значень q_i у структурі викидів становить:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = 1;$$

n – кількість ЗР, які викидаються підприємством [9].

Запропонований показник розраховується для кожного підприємства окремо. Проте НСВ використовується в тому числі для інтегральної оцінки з урахуванням КНП, який дозволяє провести узагальнення по місту в цілому.

Викладення основного матеріалу. Було виконано оцінку показника НСВ для міст Одеської області за період 2012 – 2021 рр. Для оцінки були використані дані Регіональних доповідей про стан навколишнього середовища в Одеській області [10], а також надані офіційно матеріали Головного управління статистики в Одеській області щодо викидів ЗР в атмосферне повітря від стаціонарних джерел.

Аналіз проводився по 6 містах Одеської області. Враховуючи, що інформація по викидах всіх ЗР не була представлена в повному обсязі, розрахунок проводився для 4 основних ЗР – пил, SO_2 , NO_2 , CO . Результати розрахунку показника НСВ наведено на рис. 1.

Аналіз представленого рисунку показує, що для більшості міст (Одеса, Чорноморськ, Південне, Теплодар) найбільшу небезпеку справляють викиди NO_2 . У містах Ізмаїл і Біляївка найбільшу небезпеку справляли викиди SO_2 . Якщо враховувати клас небезпеки ЗР, то фактично мінімальна небезпека відзначається по викидах CO , який відноситься до 4 класу небезпеки. Інші 3 ЗР відносяться до 3 класу небезпеки і сумарно формують переважну небезпеку за обсягами викидів. Слід також відзначити, що для м. Теплодар фактично весь період буди відсутні дані по викидах пилу та SO_2 (2013 – 2021 рр.). Також обмеженими були дані по викидах ЗР у м. Біляївка.

Також було проаналізовано розподіл значень НСВ для окремих міст Одеської області (табл. 1).

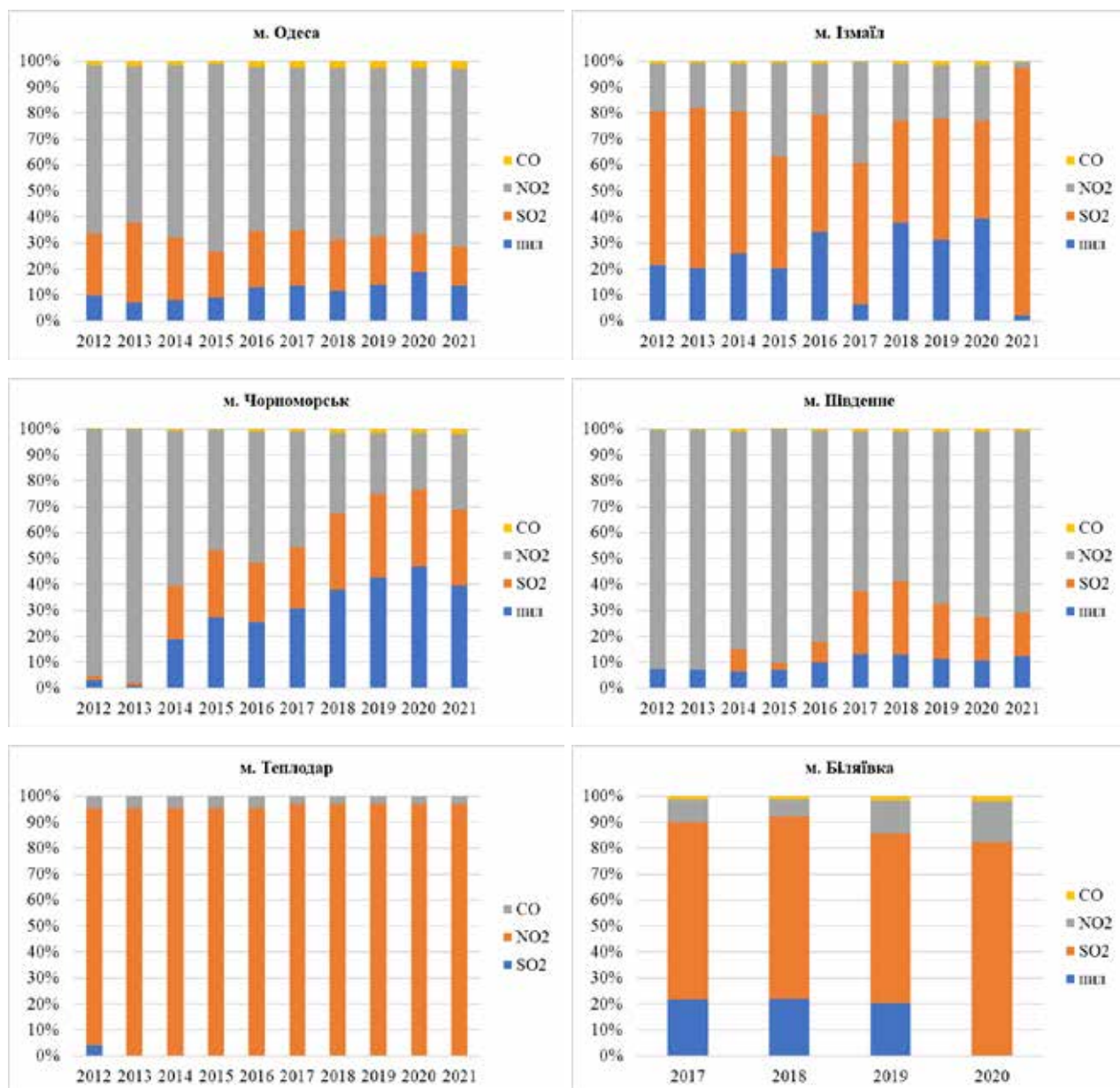


Рис. 1. Розрахунок небезпеки структури викидів для міст Одеської області

Таблиця 1

Динаміка зміни показника НСВ по окремих містах Одеської області

Рік	м. Одеса	м. Ізмаїл	м. Чорноморськ	м. Південне	м. Теплодар	м. Біляївка
2012	10,71	11,49	21,62	17,60	6,38	
2013	10,44	11,85	23,69	17,81	6,37	
2014	10,55	10,42	12,78	15,18	6,24	
2015	13,20	12,32	12,46	19,19	6,32	
2016	8,92	9,59	11,33	14,63	6,35	
2017	8,61	17,48	10,73	12,88	8,59	9,59
2018	7,90	8,28	8,02	13,02	8,46	9,46
2019	8,18	8,40	7,64	14,00	8,59	9,22
2020	7,56	7,88	7,46	14,00	8,42	10,53
2021	7,76	17,84	7,59	14,01	8,75	

Слід відзначити, що автор роботи [9] вказував на відсутність прямих залежностей між *КНП* та *НСВ*. Специфіка розрахунку *НСВ*, на наш погляд полягає саме у врахуванні складу викидів з урахуванням класу небезпеки речовин.

З урахуванням отриманих даних нами всі результати розрахунків умовно були розподілені на три групи: 1 – $НСВ \leq 10$; 2 – $10 < НСВ \leq 20$; 3 – $НСВ > 20$. Так, виходячи із запропонованої градації, у переважній більшості всі міста Одеської області можна віднести до 1-ої і 2-ої груп. Виключення складають значення *НСВ* для м. Чорноморськ у 2012 – 2013 рр., що обумовлено високими показниками викидів NO_2 . Також слід звернути увагу на досить високі отримані показники у містах Ізмаїл, Чорноморськ, Південне порівняно з обласним центром – м. Одеса. Це може свідчити про те, що незважаючи на абсолютні значення обсягів викидів ЗР, важливою складовою є саме внесок окремої ЗР у загальні показники викидів.

Головні висновки. У роботі було виконано огляд методичних підходів до оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн, а також проаналізовано науково-методичну літературу і публікації, присвячені оцінці навантаження в окремих регіонах України. Розглянуто показник небезпеки структури викидів як альтернативу для оцінки впливу стаціонарних джерел і складову інтегральної оцінки впливу промисловості на стан повітряного басейну. В результаті виконаного дослідження можна зробити такі висновки:

1. Перелік методик, які використовуються для оцінки техногенного навантаження на повітряний басейн, значно різняться. Кожен з методів використовує різні показники, параметри та оціночні шкали.

2. Виконана спроба апробації оцінки рівня техногенного навантаження на повітряний басейн на основі розрахунку показника *НСВ* для міст Одеської області, який розглядається як додатковий для проведення комплексної оцінки техногенного впливу від стаціонарних джерел.

3. Для більшості міст Одеської області найбільшу небезпеку справляють викиди NO_2 . З урахуванням класу небезпеки ЗР мінімальна небезпека відзначається по викидах CO , який відноситься до 4 класу небезпеки.

4. На основі отриманих даних запропоновано градації *НСВ*. У переважній більшості всі міста Одеської області можна віднести до 1-ої і 2-ої груп (виключення – м. Чорноморськ у 2012 – 2013 рр. за рахунок високих показників викидів NO_2). Незважаючи на абсолютні значення обсягів викидів ЗР, важливою складовою є саме внесок окремої ЗР у загальні показники обсягів викидів.

Отримані результати представляють певний методичний інтерес. Проте для більш детальної оцінки необхідно мати повну інформацію щодо структури викидів у населених пунктах, що може у подальшому бути основою для розробки ефективних природоохоронних заходів щодо поліпшення стану атмосферного повітря в регіонах.

Література

1. Стратегія сталого розвитку України до 2030 року. Проект – 2017. URL: https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/migration/ua/UNDP_Strategy_v06-optimized.pdf (дата звернення: 13.07.2025).
2. Указ Президента України «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 13.07.2025).
3. Прищеп А.М., Вознюк Н.М., Брежицька О.А., Стецюк Л.М., Ковальчук Н.С., Буднік З.М. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з навчальної дисципліни «Екологічна безпека регіонів» для студентів спеціальності 101 «Екологія» та 183 «Технології захисту навколишнього середовища» денної та заочної форм навчання. Рівне: НУВГП, 2018. 55 с.
4. Сафранов Т.А., Адаменко Я.О., Приходько В.Ю., Шаніна Т.П., Чугай А.В., Колісник А.В. Системний аналіз якості навколишнього середовища. Підручник. Одеса: Екологія, 2015. 244 с.
5. Чугай А.В. Науково-методологічні засади комплексної оцінки техногенного навантаження на поліфункціональні території (на прикладі Північно-Західного Причорномор'я): автореф. дис. д-ра техн. наук: 21.06.01. Київ, 2020.
6. Радевич Т.В., Ночовна Ю.О., Самбурська Н.І. Моделювання інтегрального показника загального рівня екологічної безпеки підприємства. *Економічний аналіз*. 2017. Т. 27. № 2. С. 182 – 191.
7. Валерко Р.А., Герасимчук Л.О. Оцінка рівня техногенного навантаження Житомирської області. *Вісник ЖНАЕУ*. 2017. № 1 (58). Т. 1. С. 39 – 48.
8. Пасенко А.В., Солошич І.О. Інновації екологічного управління автотранспортною системою урбоєкосистем з метою зниження техногенного навантаження на атмосферу. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 8. С. 269 – 278.
9. Горський А. Оцінка техногенного впливу стаціонарних джерел забруднення на стан повітряного басейну Київської агломерації. *Економіка природокористування і сталий розвиток*. 2021. Вип. 9. С. 72 – 79.
10. Департамент екології та природних ресурсів Одеської обласної державної адміністрації. URL: <https://ecology.od.gov.ua/zvity/> (дата звернення: 10.07.2025).

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.07.2025

Дата прийняття до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ПИТАННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО УПРАВЛІННЯ

УДК 378.016

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ЕКОЛОГІВ У ПИТАННЯХ УПРАВЛІННЯ У ПРИРОДООХОРОННІЙ ДІЯЛЬНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Самойленко Н.М., Новожилова Т.Б., Шестопалов О.В., Чікірякін К.В., Титаренко А.І.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул.Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

Nataliia.Samoilenko@khpi.edu.ua, Tetiana.Novozhylova@khpi.edu.ua, Oleksii.Shestopalov@khpi.edu.ua,

Kyrylo.Chikiriakin@mit.khpi.edu.ua, Andrii.Tytarenko@mit.khpi.edu.ua

Інтелектуальний і науково-технічний потенціал та кадри високої кваліфікації, підготовка яких проводиться у вищій школі, є важливою основою сталого розвитку країни та її стратегічних ресурсів, що забезпечують спроможність економічного зростання та високий соціально-економічний рівень держави у нинішній час та у майбутньому. У цьому зв'язку якість підготовки випускників не тільки за освітніми програмами, але й за окремими дисциплінами, повинна сприяти успішному отриманню необхідних компетенцій та результатів навчання, що адаптовано змінюються до потреб суспільства. У статті представлено результати аналізу програм нормативних дисциплін, які стосуються управління у природоохоронній діяльності та екологічної безпекою, що вивчаються здобувачами першого та другого рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Інженерна екологія» спеціальностей Е2 Екологія та G2 «Технології захисту навколишнього середовища». Підкреслено, що дані дисципліни характеризуються особливостями, які зумовлюються поєднанням базових знань з управлінської діяльності та специфічних – природничих і технічних. Проаналізовано програми зазначених дисциплін та зазначено відмінність їх контенту щодо визначення найбільш важливих питань. Запропоновано підхід до удосконалення змісту програм та актуалізації навчальної інформації, що передбачає аналіз останніх наукових публікацій у сфері природоохоронного управління та екологічної безпеки, а також програм даної направленості, які реалізуються у закордонних університетах, та пропозицій здобувачів вищої освіти.

Аналіз наукових джерел інформації аргументує об'єктивну необхідність введення у зміст програм дисциплін, що розглядаються, питань екологічної політики, сталого розвитку та сталого управління об'єктами довкілля. Також актуальними є питання державного управління та правових основ, інтегральності управління, зростаючої ролі громадськості в екологічному управлінні, використання штучного інтелекту. Результати опитування здобувачів освіти показали зацікавленість питаннями актуалізації нормативної інформації, практики управління щодо запровадження природоохоронних заходів, а також використання ІІІ в екологічному управлінні. Крім того, висловлена готовність підвищення рівня знань шляхом самостійної роботи з даних дисциплін та самоосвіти. *Ключові слова:* природоохоронна діяльність, екологічна безпека, управління, якість підготовки, зміст програми дисципліни.

Improving the quality of environmentalists' training in management disciplines related to environmental protection and ecological safety. Samoilenko N., Novozhylova T., Shestopalov O.V., Chikiriakin K.

Intellectual, scientific, and technical potential and highly qualified personnel trained in higher education are an important basis for the country's sustainable development and its strategic resources, which ensure the ability of economic development and a high socio-economic level of the state at present and in the future. In this regard, the quality of graduates' training in educational programs and individual disciplines should contribute to achieving the necessary competencies and learning outcomes adapted to society's changing needs. The article presents the results of an analysis of the programs of regulatory disciplines related to management in environmental protection and environmental safety, which are studied by first- and second-level students of the educational and professional program 'Engineering Ecology,' specialties E2 «Ecology» and G2 «Environmental Protection Technologies». It is emphasized that these disciplines are characterized by features determined by a combination of basic knowledge of management activities and specific knowledge of natural and technical sciences. The programs of these disciplines are analyzed, and the difference in their content is noted in determining the most important issues to be studied. The author proposes an approach to improving the content of programs and updating educational information, which involves analyzing the latest scientific publications in environmental management and environmental safety, as well as programs in this area implemented in foreign countries.

The analysis of scientific sources of information argues for the objective need to introduce environmental policy, sustainable development, and sustainable management of environmental objects into the content of the programs of the disciplines under consideration. Also relevant are the issues of public administration and legal frameworks, the integrity of management, the growing role of the public in environmental management, and the use of artificial intelligence. The results of the survey of students showed interest in the issues of updating regulatory information, management practices for the implementation of environmental protection measures, and the use of artificial intelligence in environmental management. In addition, they expressed their readiness to improve their knowledge through independent work in the disciplines and self-education. *Key words:* environmental protection, environmental safety, management, quality of training, and content of the discipline programme.

Постановка проблеми. Антропогенний вплив на довкілля в Україні у теперішній час характеризується особливою негативною дією, пов'язаною не тільки з господарсько-економічною діяльністю, а й з тими згубними наслідками, які привнесла війна. Задачі управління природоохоронною діяльністю розширюються і включають все більше питань, які раніше не визначалися гостротою і важливістю. Поряд з цим розвиток інноваційних технологій, які можуть бути застосовані у екологічному управлінні, вимагають знання їх суті та сфери застосування. Тому для успішного вирішення екологічних проблем та реалізації ефективної управлінської діяльності необхідна якісна підготовка студентів, яка враховує як потреби сьогодення, так і передбачає вирішення проблем відновного для країни періоду на шляху сталого її розвитку.

Актуальність дослідження. Підготовка фахівців у галузі управління природоохоронною діяльністю та екологічною безпекою (УПД та ЕБ) відзначається певними особливостями, що зумовлюються комплексністю напрямків здійснення, залученням різних органів управління, різноманітністю за своїм характером об'єктів управління і ін. Аналіз університетських програм з дисциплін стосовно управління у екологічній сфері показує, що основні питання, визначені для вивчення, є аналогічними та враховують законодавчо-нормативну базу, екологічну політику, структуру органів державного управління. Водночас існує і суттєва різниця щодо тем та підходів здійснення управління природоохоронною діяльністю, яка не завжди враховує зміни сьогодення, що у тому числі пов'язуються з майбутньою відбудовою країни та прийняттям у цей період багатьох управлінських рішень щодо відновлення довкілля. Це в певній мірі стримує формування фахівця-еколога, професійні компетентності якого повинні відповідати сучасним та перспективним запитам суспільства та мати спроможність до розвитку уявлень щодо сталого управління. Тому відповідальною задачею при викладанні дисциплін екологоуправлінської спрямованості є гармонічність поєднання бази знань студентів з вимогами, що ставляться сьогодні до професійних компетенцій екологів та прогнозування їх змін у перспективі.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок цієї роботи тісно пов'язаний із актуальними завданнями якісного навчання здобувачів вищої освіти, що є запорукою успішної підготовки висококваліфікованих фахівців у сфері УПД та ЕБ. Результати роботи є особливо важливими в контексті забезпечення сталості довкілля як підсумку ефективної управлінської діяльності щодо його здатності витримувати негативну антропогенну дію, а також реалізації цілей сталого розвитку в країні, що поєднуються з управлінням природоохоронною діяльністю та екологічною безпекою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Формування якісної системи освіти на всіх рівнях проголошено стратегічною метою людства на наступні десятиліття та механізмом подолання існуючих на сьогоднішній день проблем та протиріч його розвитку [1]. Ключові компетентності, які важливо сформулювати в парадигмі освіти для сталого розвитку включають: 1) компетентність мислення категоріями майбутнього; 2) компетентність інтердисциплінарної роботи. У цьому зв'язку викладання дисциплін з УПД та ЕБ, що характеризується інтердисциплінарністю за своїм характером, певним чином відповідає другому запиту даних компетенцій. Водночас недостатньо визначеною є перша компетенція, що передбачає перспективні аспекти у даному виді управління і потребує аналізу та розробки.

Наукові публікації останніх років дозволяють визначити тенденції не тільки розвитку УПД та ЕБ як науки, але й виділити актуальні питання, які можуть бути в певному понятійному чи більш розширеному обсязі запропоновані для вивчення у дисциплінах, що розглядаються.

Екологічне управління в системі реалізації цілей сталого розвитку є фокусом публічного управління у сучасній та стратегічній перспективі, а стійкий розвиток є найбільш конструктивним підходом, який актуальний практично для всіх сфер суспільства і управління у глобальному масштабі [2]. У дослідженнях, звертається увага на інтегроване управління, що застосовується у сфері управління екологічною безпекою природоохоронних систем, а саме як виду управління, що націлене на перспективу. Воно зачіпає широке коло організаційних рішень з проблем, які зорієнтовані на майбутнє та на провідні цілі організації [3]. Водночас щодо поточної ситуації привертається увага на необхідності ефективної узгодженості дій усіх органів, які виконують управлінські функції щодо охорони і раціонального використання природних ресурсів України та вдосконалення правових основ управління [4].

Виділяється зв'язок управління екологічною безпекою компонентів довкілля з важливістю політичних аспектів. Як зазначається [5], кластерний аналіз публікацій відносно управління екологічною безпекою поверхневих водних об'єктів дозволив виділити у напрямках актуальних досліджень не тільки управлінські, а й політичні аспекти.

У дослідженнях також робиться акцент на практичних аспектах громадянського екологічного управління в системі природоохоронної діяльності країни. Наголошено на необхідності підвищення рівня якості системи публічного управління та активності населення у прийнятті рішень, що стосуються даної діяльності. Підкреслено, що сьогодні громадськість на умовах партнерства з публічною владою починає поліпшувати якість управлінських рішень з охорони довкілля. Одним із ключових завдань об'єднаних територіальних громад є: забезпечення реалізації

екологічної політики України та екологічних прав громадян [6].

Загалом штучний інтелект вже активно застосовується як інструмент в управлінні. Але зауважується, що використання системи штучного інтелекту в системах управління екологічною безпекою регіонів, підприємств, організацій є вельми актуальним у теперішній час [7].

Взагалі питання викладання та підготовки фахівців екологічного спрямування у сфері УПД та ЕБ у літературних джерелах розглядається недостатньо. Водночас у дослідженнях [8] представляється аналіз змісту освітньо-професійних і освітньо-наукових програм підготовки здобувачів вищої освіти за спеціальністю Е2 Екологія та інтеграцію в них Цілей сталого розвитку (ЦСР). Дане дослідження підкреслює важливість представлення навчального матеріалу щодо ЦСР також у дисциплінах управлінської направленості.

Он-лайн ресурси пропонують робочі програми (силабуси) відповідних цьому напрямку дисциплін, які дозволяють ознайомитись з темами, що вивчаються. Аналіз змісту програм з однієї і тієї ж дисципліни показує суттєву різницю у визначенні найбільш важливих питань, призначених для опанування здобувачами освіти, а також у великій мірі представляє суб'єктивне відношення розробника стосовно їх вагомості.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Стаття аналізує проблему підготовки екологів з нормативних дисциплін з УПД та ЕБ, що впливає на формування якісних компетенцій та результатів навчання здобувачами вищої освіти спеціальностей Е2 «Екологія» та G2 «Технології захисту навколишнього середовища». Дослідження спрямоване на окреслення актуальних питань, необхідних для розгляду у програмах даних дисциплін, задля сприяння удосконаленню підготовки фахівців-екологів, здатних вирішувати нагальні питання УПД та ЕБ в країні, враховуючи потреби сьогодення та у перспективі.

Новизна. У роботі вперше з точки зору відповідності контенту поточним вимогам та майбутнім потребам здійснено аналіз програм підготовки здобувачів бакалаврського та магістерського рівнів за екологічними спеціальностями освітньої програми «Інженерна екологія» у дисциплінах управлінського характеру. Особливу увагу приділено аналізу оцінок студентів щодо їх поглядів на базу знань і навичок, які очікуються від результатів навчання та їх використання у професійній діяльності. Запропоновано підхід стосовно гармонізації питань, які вивчаються за програмами даних дисциплін, з актуальними потребами суспільства та змінами у довкіллі, а також з врахуванням зв'язків науки і практики та побажань здобувачів освіти і тенденцій реалізації програм навчання у закордонних університетах.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дане дослідження реалізується у викладанні нормативних дисциплін «Організація та управління у природоохоронній діяльності» та «Управління техногенною та екологічною безпекою» у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» для здобувачів спеціальностей Е2 «Екологія» та G2 «Технології захисту навколишнього середовища». Методологія дозволяє виявити потенціал для створення якісного контенту програм управлінської направленості у сфері охорони довкілля та екологічної безпеки та їх впровадження у освітню практику підготовки фахівців-екологів.

Викладення основного матеріалу. Випускник університету за екологічною спеціальністю повинен відповідати запитам суспільства щодо знань і навичок стосовно проведення природоохоронної діяльності, забезпечення екологічної безпеки та реалізації функцій організації й управління з цих та інших питань. Знання (інформація), отриманні здобувачами освіти у навчальних закладах відносно даних задач, регулярно старіють і виникає їх невідповідність потребам користувачів в силу втрати актуальності та достовірності. Зважаючи на це, викладацькою метою є постійне удосконалення підходів до навчання та змісту дисциплін, а також проведення аналізу достатності знань для вирішення професійних задач. Загально прийнятою концепцією у цьому сенсі є оновлення програм навчання відповідно запитам стейкхолдерів, у якості яких виступають будь-які зацікавлені у якісній екологічній освіті організації, особи, місцеві громади, здобувачі вищої освіти та ін. Водночас освітній процес повинен будуватися не тільки щодо вимог практики, але й на його поєднанні з наукою та інноваціями, з прогресивним інформаційним простором та його технологіями.

При викладанні дисциплін управлінського характеру доцільно враховувати досвід закордонних університетів, що також є механізмом забезпечення якості навчання. Окремих дисциплін, формулювання яких точно відповідає назві вітчизняних, у програмах інженерії навколишнього середовища, у європейських університетах, звичайно, не передбачається [9]. Водночас навчання за напрямками програмами екологічного менеджменту є досить популярним [10, 11]. Аналіз навчальних програм, представлених у різних європейських університетах, показує, що їх назви та зміст відповідають специфіці бази знань і, в свою чергу, кар'єрі випускника. Основні питання компетенцій та результатів навчання у даних програмах дещо різняться. Наприклад, університет Стерлінга (Об'єднане королівство) пропонує отримання ступеню магістра наук з управління навколишнім середовищем (охорона довкілля) та передбачає, що випускник має комплексне розуміння питань охорони природи та стратегій управління, а магістр екологічного менеджменту вивчає міждисциплінарні підходи у вирішенні екологічних проблем та

має можливість займати посади у державних установах, некомерційних організаціях та ін. Магістр наук у галузі управління навколишнім середовищем та ресурсами (університет Південної Данії) фокусується на глибокому розумінні екологічних проблем та методів управління ресурсами. Також програми концентруються на стратегіях збереження, управління навколишнім середовищем та відновленню екосистем (університет Барселони). Водночас як закономірність у зазначених програмах є вивчення питань екологічної політики, сталого розвитку, сталого управління об'єктами довкілля.

З цілю отримання інформації щодо сприйняття навчального матеріалу та пропозицій з удосконалення змісту програми з дисциплін «Організація та управління у природоохоронній діяльності» та «Управління техногенною та екологічною безпекою» здобувачам бакалаврського та магістерського рівнів вищої освіти пропонувалося відповісти на запитання:

1. Яке місце у природоохоронній діяльності відводиться її управлінню?
2. Чи є інформація, що вивчалася у дисципліні, сучасною та найбільш важливою для охорони та екологічної безпеки довкілля?
3. Чи є на сьогодні важливим глибоке вивчення аспектів природоохоронної діяльності для її реалізації у перспективному розрізі?
4. В чому проявляється місце екологічної інженерної освіти у розбудові країни у післявоєнний період та як це пов'язується з екологічним управлінням?
5. Чи є предмет управління природоохоронною діяльністю інтердисциплінарним? Якщо «так», то в чому це має прояв?
6. Чи є у вас достатня уява щодо системи державного управління у природоохоронній сфері та у сфері забезпечення екологічної безпеки?
7. Чи розумієте ви стратегічні напрямки управління природоохоронною діяльністю у контексті сталого розвитку?
8. Чи зрозумілі вам механізми, методи та технології управлінської діяльності для практичного їх використання?
9. Чи зможете ви на різних рівнях планувати та реалізовувати природоохоронні заходи?
10. Чи є у вас переконливість у дієвості громадського екологічного управління та бажання його реалізовувати?
11. Чи є суттєвим інтернаціоналізація управління природоохоронною діяльністю у теперішній час та у перспективі?
12. Чи готові ви розширювати знання з дисциплін шляхом самостійної роботи та самоосвіти? Якщо «так», то в якій формі?
13. Чи вивчаєте ви іноземну мову для здійснення професійної діяльності у міжнародній екологічній сфері?

14. Чи сформована у вас впевненість щодо успішної професійної діяльності у сфері екологічного управління?

15. Які ви могли б надати пропозиції щодо удосконалення навчальної програми управлінських дисциплін екологічного спрямування?

Визначено, що більшість студентів приділила увагу набуттю знань з професійної діяльності щодо:

- 1) актуальних та поточних змін у нормативній сфері стосовно екологічного управління та пов'язаних з ним діяльності, викликаними, у свою чергу, змінами в країні;
- 2) виробітку управлінського рішення відносно запровадження інженерного природоохоронного заходу на різних об'єктах;
- 3) використання штучного інтелекту для прогнозу змін у довкіллі та розробки стратегій управління щодо його охорони і відновлення, оптимізації управління стосовно ефективного використання природних ресурсів, застосування у експертних системах та ін.;
- 4) застосування дронів у природоохоронній сфері та екобезпеці територій і об'єктів.

Крім того, здобувачами освіти було висловлено бажання щодо:

- 1) мобільності у європейські університети та вивчення курсів за програмами управління охороною довкілля;
- 2) прослуховування лекцій провідних фахівців з державного управління, екологів-практиків промислових підприємств, участь у вебінарах, тренінгах та ін. (можливо у рамках самостійної роботи або самоосвіти).

Отримані відповіді використовувалися для актуалізації та корегування навчальної інформації з даних дисциплін, визначення тем для проведення досліджень у рамках студентських наукових робіт, а також для самостійної роботи студентів.

Окрема увага приділена самостійній роботі студентів, яка можлива у таких формах як систематичне ознайомлення з періодичними фаховими виданнями, застосування інформаційно-комунікаційних технологій у пошуку та отриманні актуальної професійної інформації, участь у конференціях, тренінгах, вебінарах, воркшопах та ін.

Головні висновки. Підготовка фахівців-екологів інженерного спрямування з питань управління у природоохоронній діяльності та екологічної безпеки концентрується як на отриманні базових знань щодо загальних основ управлінської діяльності, так і на специфічних, які поєднують суто природничі та технічні підходи. Зважаючи на це, у програмах підготовки з управлінських дисциплін доцільно обґрунтовувати та гармонійно сполучати дані напрямки та враховувати актуальні запити і вимоги, які ставляться до професійної кваліфікації та знань випускників, пов'язаних з роботою у короткій та довгостроковій перспективі.

Аналіз наукових джерел, програм дисциплін у закордонних та у деяких вітчизняних університетах показав спільний підхід до важливості питань екологічної політики, сталого розвитку та сталого управління об'єктами довкілля, які доцільно включати у програми даних нормативних дисциплін. Останні наукові дослідження звертають увагу на необхідність удосконалення державного управління та правових основ, інтегральність управління, зростаючу роль громадськості в екологічному управлінні, використанні ШІ у управлінні. Ці питання рекомендовано відзначати при викладанні відповідних тем дисципліни та пропонувати для самостійної роботи (наприклад, щодо штучного інтелекту). Опитування здобувачів освіти показало зацікавленість у вивченні питань щодо актуалізації нормативної інформації, яка динамічно змінюється у відповідь на зміни в країні, а також акцент

на практичні питання організації та управління при розробці і запровадженні інженерного природоохоронного заходу, застосування ШІ в екологічному управлінні. Крім того, висловлено бажання стосовно вивчення курсів даної направленості за програмами мобільності. Також слід зазначити доцільність приділення більшої уваги до самостійної роботи здобувачів вищої освіти та їх заохочення до самоосвіти (наприклад, у розширенні знань зі штучного інтелекту).

Перспективи використання результатів дослідження. Запропонований підхід до актуалізації програм управління у природоохоронній діяльності та екологічній безпеці може бути прийнятий до уваги при викладанні відповідних дисциплін при підготовці фахівців за освітньою програмою з інженерної екології та сприяти підвищенню якості викладання предметів.

Література

1. Аналіз провідного вітчизняного та зарубіжного досвіду щодо стратегій вищої освіти в умовах інтернаціоналізації для стійкого розвитку суспільства: аналітичні матеріали. У двох частинах / В. Зінченко, В. Брижнік, Л. Горбунова, С. Курбатов, Ю. Мелков, І. Сікорська, І. Степаненко, О. Шипко; за ред. В. Зінченка. Київ: Прінтеко, 2020. URL: https://ihed.org.ua/wp-content/uploads/2021/03/Analiz_strategiy_VO_v_umovah_internac_ch1-2_analit_IVO-2020-270p_avtors-kolektiv.pdf (дата звернення 20.06.2025)
2. Лавний А. В. Екологічне управління в системі реалізації цілей сталого розвитку. *Ефективність державного управління*. 2024. № 1(78/79). С. 66–70.
3. Методологія інтегрованого управління екологічною безпекою природоохоронних систем / В. Г. Петрук та ін. *Екологічні науки*. 2021. № 2. С. 153–161.
4. Вітовська І. В. Управлінська діяльність в галузі охорони довкілля. *Науково-інформаційний вісник Івано-Франківського університету права імені Короля Данила Галицького*. Серія: Право. 2023. Вип. 15 (27). Т. 1. С. 135–139. DOI: 10.33098/2078-6670.2022.15.27.1.135-139.
5. Кірейцева Г.В. Теоретичні основи управління екологічною безпекою поверхневих водних об'єктів в умовах антропогенного навантаження. *Екологічні науки*. 2024. № 6(57). С. 70–74.
6. Кононенко І.А. Громадське екологічне управління в системі природоохоронної діяльності. *Публічне управління та митне адміністрування*. 2022. № 1 (32). С. 24–28.
7. Машков О., Присяжний В., Оводенко Т. Напрями застосування системного підходу в системі державного управління екологічною безпекою з використанням аерокосмічних технологій. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Національна безпека*. 2024. № 2 (2). С. 17–24.
8. Бондаренко Л.І., Волошина Н.О., Шевченко В.Г., Лавріненко В.М. Інтеграція цілей сталого розвитку у освітні програми підготовки екологів, *Екологічні науки*. 2025. № 1 (58). С. 14–17.
9. Environmental Engineering degrees in Europe URL:<https://www.educations.com/environmental-engineering/europe> (дата звернення 20.06.2025)
10. Environmental Management degrees in Europe URL:<https://www.educations.com/environmental-management/europe> (дата звернення 20.06.2025)
11. Environmental Management BSc & Bachelor's degree degrees in Europe URL:<https://www.educations.com/bachelors-degree/environmental-management/europe> (дата звернення 20.06.2025)

Дата першого надходження рукопису до видання: 11.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ ЗГІДНО СЕРІЙ СТАНДАРТІВ ISO 14000, ISO 31000, ISO 19011

Цопа В.А.¹, Чеберячко Ю.І.^{2,3}, Борисовська О.О.², Дерюгін О.В.², Чеберячко Л.М.²

¹Міжнародний інститут менеджменту

вул. Шулявська, 04116, м. 10/12, блок В, м. Київ

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, Дніпро

³ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»

Південне шосе, 80, 69008, м. Запоріжжя

cheberiachkoyi@ukr.net

Виникає необхідність у перетворенні системи екологічного менеджменту з формального інструменту відповідності на дієвий і вдосконалений механізм управління, мінімізації ризиків та створення довгострокової цінності для організації через підвищення її гнучкості та інтеграції в реалії бізнесу. Вдосконалення системи екологічного менеджменту організації, за рахунок комплексного застосування допоміжних стандартів серії ISO 14000, а також суміжних стандартів (зокрема серії стандартів ISO 31000:2018 і ISO 19011:2018). Використаний методологічний підхід, який базується на емпіричному дослідженні, включаючи проведення комплексного огляду літератури та експертних інтерв'ю, щодо побудови сценаріїв для покращення СЕМ. Вдосконалено систему екологічного менеджменту згідно вимог стандарту ISO 14001:2015, який виступає у вигляді рамкової структури, що наповнюється практичними інструментами, виходячи із вимог допоміжних стандартів серії ISO 14000, а також суміжних стандартів (зокрема серії стандартів ISO 31000), що дозволяє не лише виконати вимоги, а створити потужну основу для постійного поліпшення. Запровадження інтеграції різних стандартів серії ISO 14000 дозволяє перетворити систему екологічного менеджменту з центру витрат на інструмент створення додаткової цінності організації, що сприяє не лише зменшенню негативного впливу на довкілля, але й досягненню прямих економічних зисків через оптимізацію ресурсів, мінімізацію відходів, зниження фінансових ризиків та підвищення конкурентоспроможності. Подальший розвитку систем екологічного менеджменту передбачає зосередження на економіці, «зелених» фінансах, біорізноманітті та подальшій деталізації кліматичних дій, з урахуванням, впливу проактивності як ключової умови для довгострокової стійкості, сталості та успіху бізнесу в сучасному світі. Наукова новизна полягає у формуванні взаємозв'язку між етапами циклу PDCA та вимогами ISO 14001, які додатково посилюються оцінюванням ризиками відповідно до серії стандартів ISO 31000, оцінюванням життєвого циклу відповідно до ISO 14040/44, розробкою екодизайну на основі ISO 14006, оцінюванням дієвості, виходячи з вимог ISO 14031, створенням умов екологічної комунікації (ISO 14063, серія ISO 14020), фінансовою оцінкою, виходячи з ISO 14007/8 та принципи циркулярної економіки, що описується стандартами ISO 14009 та ISO 14051. Практична цінність полягає у розробці рекомендації щодо розвитку системи екологічного менеджменту передбачає зосередження на економіці, «зелених» фінансах, біорізноманітті та подальшій деталізації кліматичних дій, з урахуванням, впливу проактивності. *Ключові слова:* система екологічного менеджменту, екологічне управління, оптимізація ресурсів, відповідність стандартів серії ISO 14000, екологічна комунікація, цикл PDCA

Improvement of the environmental management system in accordance with the ISO 14000, ISO 31000, ISO 19011 standards.
Tsopa V.A., Cheberiachko Yu., Borisovska O., Deryugin O., Cheberiachko L.

There is a need to transform the environmental management system from a formal compliance tool into an effective and improved management mechanism, minimizing risks and creating long-term value for the organization by increasing its flexibility and integrating it into business realities. Improving the organization's environmental management system through the comprehensive application of auxiliary standards of the ISO 14000 series, as well as related standards (in particular, the ISO 31000:2018 and ISO 19011:2018 series of standards). The methodological approach used is based on empirical research, including a comprehensive literature review and expert interviews, to build scenarios for improving the EMS. The environmental management system has been improved in accordance with the requirements of the ISO 14001:2015 standard, which acts as a framework structure filled with practical tools based on the requirements of auxiliary standards of the ISO 14000 series, as well as related standards (in particular, the ISO 31000 series), which allows not only to meet the requirements but also to create a powerful basis for continuous improvement. The introduction of the integration of various standards of the ISO 14000 series allows transforming the environmental management system from a cost center into a tool for creating additional value for the organization, which contributes not only to reducing the negative impact on the environment but also to achieving direct economic benefits through resource optimization, waste minimization, financial risk reduction, and increased competitiveness. Further development of environmental management systems involves focusing on the economy, "green" finance, biodiversity, and further detailing of climate actions, taking into account the impact of proactivity as a key condition for long-term sustainability, stability, and business success in the modern world. The scientific novelty lies in the formation of the relationship between the stages of the PDCA cycle and the requirements of ISO 14001, which are additionally strengthened by risk assessment according to the ISO 31000 series, life cycle assessment according to ISO 14040/44, eco-design development based on ISO 14006, effectiveness assessment based on the requirements of ISO 14031, creation of environmental communication conditions

(ISO 14063, ISO 14020 series), financial assessment based on ISO 14007/8, and the principles of the circular economy described by ISO 14009 and ISO 14051 standards. The practical value lies in the development of recommendations for the development of the environmental management system, focusing on the economy, “green” finance, biodiversity, and further detailing of climate actions, taking into account the impact of proactivity. *Key words:* environmental management system, environmental management, resource optimization, compliance with ISO 14000 series standards, environmental communication, PDCA cycle

Постановка проблеми. Стандарт ISO 14001:2015 є фундаментальним документом у сфері екологічного менеджменту [1]. Він визначає вимоги до системи екологічного менеджменту, яка дозволяє організації підвищувати свою екологічну дієвість. Також виконувати зобов'язання щодо відповідності та досягати поставлених екологічних цілей. В його поточній версії відбувається перехід від суто процедурного, часто ізольованого підходу, орієнтованого на формальне дотримання вимог, до стратегічно інтегрованої системи, яка є невід'ємною частиною загального управління організацією та її бізнес-процесів [2]. Ключовою метою такої системи являється не тільки запобігання забруднення навколишнього середовища, а й у наданні вищому керівництву надійної інформації та інструментів для досягнення довгострокового успіху та створення можливостей для сталого розвитку [3]. Це охоплює захист довкілля шляхом запобігання або послаблення несприятливих впливів від виробничої діяльності, а також дозволяє досягнути фінансових та операційних переваг, що зміцнюють позиції на ринку [1, 3]. Таким чином, система екологічного менеджменту (СЕМ) перетворюється з центру витрат на інструмент створення цінності. Фундаментом цієї трансформації є так звана високорівнева структура (High-Level Structure, HLS), яку Міжнародна організація зі стандартизації (ISO) запровадила для всіх нових та переглянутих стандартів на системи менеджменту. HLS забезпечує уніфіковану структуру (10 розділів), ідентичний основний текст, а також спільні терміни та визначення [4]. Ця гармонізація суттєво полегшує для організацій інтеграцію СЕМ за ISO 14001:2015 з іншими системами, такими як система менеджменту якості (ISO 9001:2015), система менеджменту охорони здоров'я та безпеки праці (ISO 45001:2018) або система енергетичного менеджменту (ISO 50001:2018), створюючи єдину, узгоджену систему управління. Звідси виникає актуальна задача щодо перетворення системи екологічного менеджменту з формального інструменту відповідності на дієвий і вдосконалений механізм управління, мінімізації ризиків та створення довгострокової цінності для організації. Її вирішення дозволить побудувати СЕМ більш гнучкою, проактивною та інтегрованою в реалії бізнесу.

Аналіз літературних джерел. В роботі [5] проаналізовані чинники, які впливають на результативність СЕМ. Автори вказують, що розмір організації являється ключовим чинником, який обумовлює необхідність впровадження СЕМ. При цьому зазначається, що застосування СЕМ дозволяє покращити

фінансові можливості та імідж компанії. Разом з тим, в публікації не проведено аналіз всіх витрат в СЕМ. Крім того, аналіз проведено тільки на основі даних успішних компаній.

В роботі [6] автори показали, що основною мотивацією компаній до впровадження СЕМ являється необхідність дотримання законодавчих положень щодо охорони навколишнього середовища, а також пошук фінансування для реалізації рішень для подальшого зниження рівня забруднення навколишнього середовища. В роботі запропоновано для вдосконалення СЕМ виходити із чотирьох принципів: мінімізація кількості сировини, необхідної для виробництва, зазвичай шляхом використання нових технологій та переробки; мінімізація інтенсивності забруднення та відходів, що утворюються під час виробництва шляхом використання замкнутих циклів; виготовлення виробів або частин виробів з тривалим терміном служби, завдяки чому використання нової сировини для виробництва зміщується в часі; проектування та організація всіх етапів виробничого процесу для захисту навколишнього середовища. Для цього необхідно доопрацювати екологічні стандарти з метою полегшення ідентифікації екологічних аспектів та збільшення потенціалу прийнятих рішень. Разом з тим, запропоновані заходи потребують довгострокового обговорення, що може призвести до неочікуваних результатів.

В роботі [7] автори зробили висновок, що покращення можливостей підприємства в галузі екологічного менеджменту стає додатковим ресурсом та дозволяє отримати конкурентну перевагу, за рахунок зниження ймовірності екологічних аварій, зменшити витрати на ліквідацію наслідків аварій та витрати на порушення екологічного законодавства. Разом з тим, щоб досягнути позитивних показників від запровадження СЕМ, автори пропонують урядам країн комплексно використовувати адміністративне регулювання та ринкові підходи для встановлення екологічних обмежень, сприяючи зеленій трансформації галузей з високим вмістом вуглецю шляхом більш вдосконаленої розробки екологічної політики.

В роботі [8] автори проаналізували результативність запровадження СЕМ для готелей-казино та заявили про її неефективність. Автори наголошують, що застосування СЕМ без урахування наслідків діяльності зазначених суб'єктів господарювання на соціальне, економічне та природне середовище призводить до непередбачуваних результатів. В дослідженні зазначається, що готелі-казино стали серйозною проблемою щодо екологічних послуг та продуктів, це вимагає застосування інтегрованих

систем управління, які б дозволили продемонструвати переваги розвитку такого бізнесу.

В роботі [9] автори запропонували вдосконалення СЕМ за рахунок поєднання його з системами енергоменеджменту (СЕМН) з впровадженням технологій рекуперації енергії (ТРЕ). Автори показали, що об'єднання СЕМ і СЕМН не дозволяють отримати той ефект, який би дозволив отримати значні фінансові прибутки. Це може бути пов'язано зі значним споживанням енергії, яка в короткостроковій перспективі не дозволяє отримати бажані фінансові показники. Разом з тим, автори говорять, що інтеграція потрібна, але для її успішного проведення необхідно детально з'ясувати всі існуючі взаємозв'язки між різними під системами та проведення відповідних досліджень складності виготовлених продуктів і технологічної інтенсивності виробництва.

В роботі [10] автори доводять, що можливості підприємств у сфері екологічного менеджменту сприяють економічній доданій вартості. В публікації вказується, що існує значна позитивна кореляція між можливостями екологічного менеджменту та економічною доданою вартістю. Це досягається за рахунок зменшення ймовірності екологічних аварій.

В роботі [11] автори досліджують взаємозв'язок між СЕМ та оцінкою економічної ефективності. Це дозволило їм зробити висновок, що вдосконалення СЕМ можливе за рахунок озеленення клімату своїх організацій через інтеграцію цифрових технологій у зелені інновації та виробничі процеси. Для цього рекомендується створити «зелені» команди, які будуть заохочувати всіх інших до запровадження бережливих технологій.

В роботі [12] автори виявили інституційні ізоморфні процеси в СЕМ, що призводять до пасивних заходів, оскільки виникає необхідність в трансформації та адаптації зовнішнього тиску. Автори показали відсутність суттєвих відмінностей між компаніями з СЕМ і без нього, якщо керівництво не докладає зусиль для забезпечення функціонування СЕМ. Іншими словами, ця робота показує, що може існувати загальна закономірність впровадження СЕМ, незалежно від типу стандарту, що використовується як орієнтир. Для підвищення результативності СЕМ потрібно щоб був подоланий процедурний (формальний) підхід. Зазначається результат можна досягти тільки за умови щоденної взаємодії як «зверху вниз», так і «знизу вверх».

Аналіз літератури показав значну зацікавленість власників бізнесу в запровадженні СЕМ в компаніях. Разом з тим, дискусія ведеться навколо забезпечення результативності СЕМ. Для цього досліджуються різні шляхи від створення інтегрованих систем управління до пошуку конкретних процедур, які б дозволили працівникам дотримуватись відповідних вимог. Разом з тим, першим кроком до результативності СЕМ являється розробка дієвої моделі, яка б розумно пов'язала всі елементи системи в єдине ціле

для досягнення поставленої мети при мінімальних збитках [6, 7, 12, 13]. Для цього потрібно проаналізувати принципи, вимоги та структуру стандарту ISO 14001:2015 як основи для системи екологічного менеджменту та продемонструвати, як комплексне застосування допоміжних стандартів серії ISO 14000, а також суміжних стандартів (зокрема серії стандартів ISO 31000), дозволяє не лише виконати вимоги, але й суттєво вдосконалити СЕМ [14].

Мета статті – вдосконалення системи екологічного менеджменту організації за рахунок комплексного застосування допоміжних стандартів серії ISO 14000, а також суміжних стандартів (зокрема серії стандартів ISO 31000:2018 і ISO 19011:2018).

Матеріали і методи. Використаний методологічний підхід, який базується на емпіричному дослідженні, включаючи проведення комплексного огляду стандартів серії ISO 14000 (табл. 1) та експертних інтерв'ю [15] щодо побудови сценаріїв для покращення СЕМ (рис. 1). Огляд літератури слугував для аналізу передового досвіду в СЕМ, а також для огляду державного регулювання в сфері екологічного управління. Експертні інтерв'ю заповнюють прогалину в знаннях про те, як можна здійснити інтеграцію різних стандартів для досягнення кращої результативності та дієвості СЕМ.

Результати дослідження. На основі експертного обговорення визначено, що на етапі «Планування», який є базовим для системи екологічного менеджменту, визначаються пріоритети, встановлюються цілі та розробляються плани. Якість цього етапу безпосередньо впливає на результативність усієї СЕМ. Після завершення етапу «Планування» організація переходить до реалізації намічених планів. На етапі «Реалізації» охоплюється забезпечення необхідними ресурсами та компетентністю, налагодженням комунікацій, а також впровадження операційного контролю над процесами. На етапах «Оцінювання» та «Поліпшення», які замикають цикл PDCA, перетворюючи його на безперервний процес поліпшення (рис. 2), відбувається перевірка досяжності запланованих результатів та запровадження корегувальних заходів на основі результатів цієї перевірки.

Для проведення етапу «Планування», виходячи з вимог пункту 6.1 ISO 14001:2018, виникає потреба у визначенні ризиків та можливостей, які пов'язані з її екологічними аспектами, зобов'язаннями щодо відповідності, а також питаннями, визначеними під час аналізу контексту. Хоча стандарт не висуває вимог щодо формалізованої системи ризик-менеджменту, він чітко вказує на необхідність мати процес для ідентифікації небезпек, визначення рівнів ризиків та їх оцінки, планування запобіжних і захисних дій для зниження ризиків до прийнятного рівня. Саме тут на допомогу приходить серія стандартів ISO 31000:2018. Хоча вона не призначена для сертифікації, але вона пропонує принципи, рамкову структуру та процес керування

Серія стандартів ISO 14000

Категорія	Назва стандарту (українською та англійською)	Коротка характеристика призначення
1	2	3
Системи управління та настанови	ISO 14001:2015(з правкою Amd 1:2024) Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосовування	Встановлює вимоги до СЕМ, на відповідність яким проводиться сертифікація. Визначає <i>що</i> потрібно робити.
	ISO 14004:2016 Системи екологічного управління. Загальні настанови щодо запровадження	Надає детальні настанови та приклади для розробки, впровадження та поліпшення СЕМ. Пояснює <i>як</i> можна виконувати вимоги ISO 14001.
	ISO 14005:2019 Системи екологічного управління. Настанови щодо гнучкого підходу до поетапного запровадження	Пропонує поетапний підхід до впровадження СЕМ, особливо корисний для малих та середніх підприємств (МСП).
Спеціалізовані настанови (серія ISO 14002)	ISO 14002-1:2019 Системи екологічного управління. Настанови щодо використання ISO 14001 для врахування екологічних аспектів та умов довкілля в межах екологічної предметної сфери. Частина 1. Загальні положення	Встановлює загальну рамку для серії стандартів 14002, що надають детальні настанови щодо конкретних екологічних тем.
	ISO 14002-2:2023 ... Частина 2: Вода (Part 2: Water)	Надає настанови щодо управління водними аспектами (споживання, якість, ризики повеней/посух) в рамках СЕМ.
	ISO/CD 14002-3 ... Частина 3: Клімат (Part 3: Climate) (у розробці)	Надасть настанови щодо управління кліматичними аспектами (пом'якшення та адаптація) в рамках СЕМ.
Оцінка та аналіз	ISO 14031:2021 Екологічне управління. Оцінювання екологічної дієвості. Настанови	Надає методологію для розробки та використання показників для вимірювання, моніторингу та оцінки екологічної дієвості.
	ISO 14040:2006 Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура	Встановлює принципи та рамкову структуру для проведення Оцінки Життєвого Циклу (ОЖЦ).
	ISO 14044:2006 Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Вимоги та настанови	Деталізує вимоги до проведення ОЖЦ, доповнюючи ISO 14040.
	ISO 14046:2014 Екологічне управління. Водний слід. Принципи, вимоги та настанови	Встановлює методологію для оцінки водного сліду продуктів, процесів та організацій на основі ОЖЦ.
Комунікація та звітність	ISO 14020:2022 Екологічні маркування та декларації. Загальні принципи	Встановлює загальні принципи для всіх типів екологічного маркування та декларацій.
	ISO 14063:2020 Екологічне управління. Екологічна комунікація. Настанови та приклади	Надає настанови щодо розробки та впровадження стратегії та діяльності з екологічної комунікації.
	ISO 14067:2018 Парникові гази. Вуглецевий слід продукції. Вимоги та настанови щодо кількісного визначення	Встановлює вимоги до розрахунку та звітування щодо вуглецевого сліду продукції.
Верифікація та запевнення	ISO 14016:2020 Екологічне управління. Настанови щодо запевнення екологічних звітів	Надає принципи та настанови для незалежної перевірки (запевнення) екологічних звітів для підвищення їх достовірності.
	ISO 14064-3:2019 Парникові гази. Частина 3. Вимоги і настанови з верифікації та валідації заяв щодо парникових газів	Встановлює вимоги до процесу верифікації звітів про викиди парникових газів.

1	2	3
Фінансові та економічні аспекти	ISO 14007:2019 Екологічне управління. Настанови щодо визначення екологічних витрат і вигод.	Допомагає організаціям ідентифікувати та кількісно оцінити екологічні витрати та вигоди, пов'язані з їх діяльністю.
	ISO 14008:2019 Грошове оцінювання впливів на довкілля та пов'язаних з ними екологічних аспектів	Надає методологію для переведення екологічних впливів у грошовий еквівалент.
Циркулярна економіка та дизайн	ISO 14006:2020 Системи екологічного управління. Настанови щодо запровадження екодизайну	Надає настанови щодо інтеграції екологічних аспектів у процес проектування та розробки продукції.
	ISO 14009:2020 Системи екологічного управління. Настанови щодо врахування циркуляції матеріалів у проектуванні та розробленні	Фокусується на стратегіях циркулярної економіки: подовження терміну служби продуктів, відновлення деталей та матеріалів.
	ISO 14051:2011 Екологічне управління. Облік витрат на матеріальні потоки. Загальна структура	Надає інструмент для обліку матеріальних потоків у фізичних та грошових одиницях, виявляючи втрати (відходи).
Суміжні стандарти	ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та керівні вказівки	Надає універсальну рамкову структуру та процес для управління будь-якими ризиками, що може бути застосована для виконання вимог п. 6.1 ISO 14001.
	ISO 19011:2018 Настанови щодо здійснення аудитів систем управління	Надає настанови щодо проведення внутрішніх та зовнішніх аудитів будь-яких систем управління, включно з СЕМ.



Рис. 1. Модель вдосконалення системи екологічного менеджменту згідно вимог і настанов серій стандартів ISO 14000, ISO 31000 та ISO 19011

ризиками, які можуть бути легко адаптовані для виконання вимог ISO 14001:2015. Використання ISO 31000:2018 дозволяє перейти від інтуїтивного до структурованого управління екологічними ризиками. Також, відповідно до пункту 6.1.2, потрібно ідентифікувати екологічні аспекти своєї діяльності, продукції та послуг. Після цього необхідно визначити ті аспекти, що мають або можуть мати значу-

щий вплив на довкілля (значущі екологічні аспекти). Для глибокого та систематичного виконання цієї вимоги слугують стандарти, пов'язані з оцінкою життєвого циклу (ОЦЖ) та екодизайном. Зокрема, стандарти ISO 14040:2006 «Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура» та ISO 14044:2006 «Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Вимоги та наста-

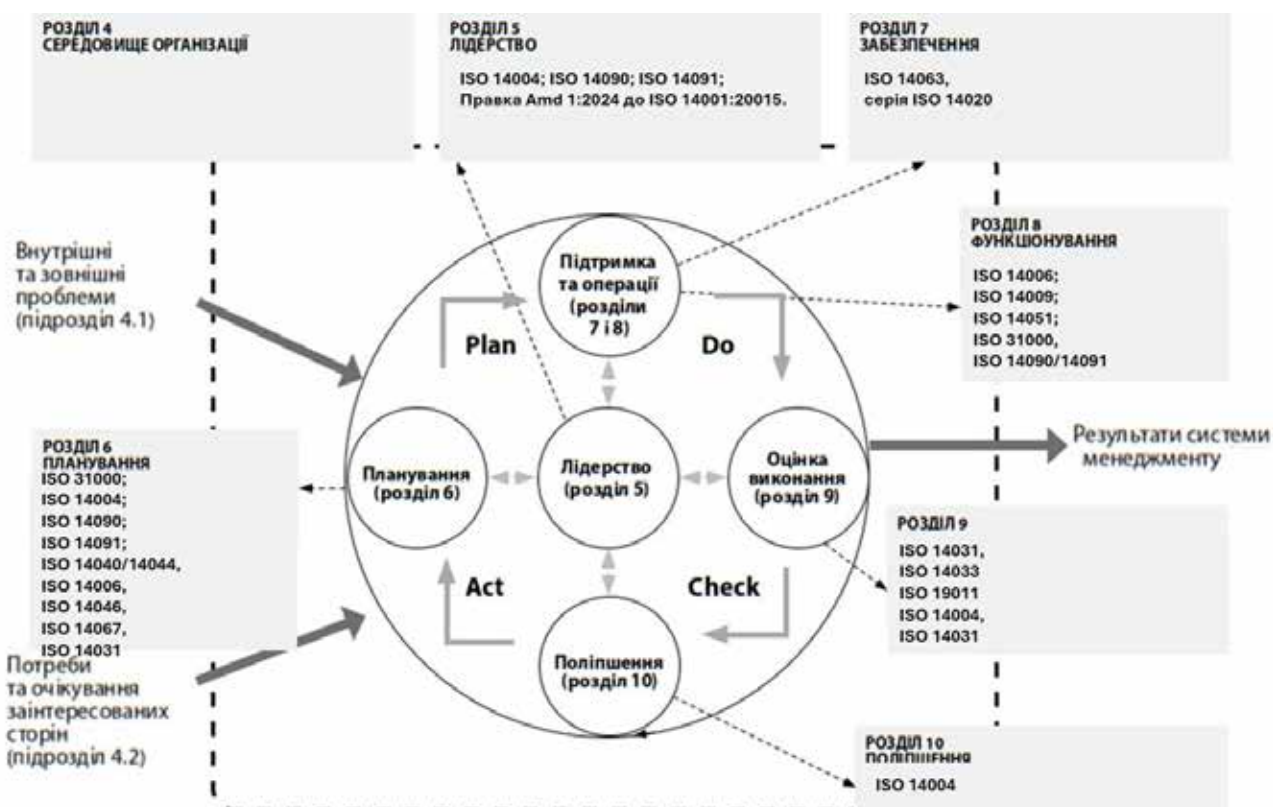


Рис. 2. Відповідність стандартів серії ISO 14000, ISO 31000:2018 та ISO 19011:2018 розділів стандарту ISO 14001:2015 і циклу PDCA

нови» разом формують методологічну основу для проведення ОЖЦ. Вони описують чотири основні етапи дослідження: визначення мети та сфери застосування; Чітке формулювання завдань дослідження; інвентаризаційний аналіз (ІАЖЦ): Збір даних про всі вхідні (ресурси, енергія) та вихідні (викиди, скиди, відходи) потоки на кожному етапі життєвого циклу продукту; оцінка впливу (ОВЖЦ): Оцінка потенційного впливу ідентифікованих потоків на довкілля (напр., внесок у зміну клімату, закислення, евтрофікацію); інтерпретація: Аналіз результатів інвентаризації та оцінки впливу для формулювання висновків та рекомендацій. Застосування ОЖЦ дозволяє організації отримати кількісні дані про вплив своїх продуктів, виявити «гарячі точки» в життєвому циклі та прийняти обґрунтовані рішення щодо визнання суттєвих (значущих) екологічних аспектів. Крім того, стандарт ISO 14006:2020 «Системи екологічного управління. Настанови щодо запровадження екологічного проектування» надає керівництво з інтеграції екологічних міркувань безпосередньо в процес проектування та розробки продукції. Він дозволяє реалізувати вимогу ISO 14001:2015 щодо впливу на етапи життєвого циклу найбільш ефективним способом – через превентивний дизайн. Таким чином, поєднання вимог ISO 14001:2015 з методологіями ISO 14040/14044 та ISO 14006:2020 дозволяє перейти від простого переліку аспектів (наприклад,

«споживання електроенергії», «утворення відходів») до глибокого розуміння їх реального впливу та проактивного управління ними ще на етапі проектування.

Окрім загальних підходів, портфель стандартів ISO/TC 207 містить інструменти для поглибленого аналізу та планування дій щодо специфічних, але все більш актуальних екологічних викликів:

- зміна клімату – для виконання цієї вимоги на високому рівні організації можуть використовувати: EN ISO 14090:2019 «Адаптація до зміни клімату. Рекомендації щодо оцінювання вразливості, впливу та ризику» та ISO 14091:2021 «Адаптація до зміни клімату. Рекомендації щодо оцінювання вразливості, впливу та ризику» та ISO 14064-1:2018 «Парникові гази. Частина 1. Вимоги та настанови щодо кількісного визначення і звітності про викиди та видалення парникових газів на рівні організації»;

- водні ресурси – для управління водними ресурсами стає критично важливим у багатьох регіонах світу можна застосувати ISO 14046:2014 «Екологічне управління. Водний слід. Принципи, вимоги та настанови» та ISO 14002-2:2023 «Environmental management systems – Guidelines for using ISO 14001:2015 to address environmental aspects and conditions within an environmental topic area Part 2: Water».

Використання цих спеціалізованих стандартів для доповнення ISO 14001:2015 дозволяє організації

не лише виконати загальні вимоги ISO 14001:2015, але й зробити це з урахуванням найбільш значущих для її контексту екологічних проблем, що значно підвищує дієвість та цінність СЕМ.

Щодо виконання пункту 6.2 ISO 14001:2015, від організації вимагається встановлення екологічних цілей на відповідних функціональних рівнях, які мають бути узгоджені з екологічною політикою, вимірними (якщо це практично можливо), враховувати значущі екологічні аспекти, зобов'язання щодо відповідності, а також ризики та можливості. Без кількісної основи цілі часто залишаються загальними та декларативними (наприклад, «зменшити вплив на довкілля»). Натомість, результати, отримані за допомогою: оцінки життєвого циклу (ISO 14040/44); розрахунку вуглецевого сліду (ISO 14064-1:2018); оцінки водного сліду (ISO 14046:2014) та оцінки екологічної дієвості (ISO 14031:2021), що дозволяють сформулювати цілі за принципом SMART (Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time-bound – Конкретні, Вимірні, Досяжні, Релевантні, Обмежені в часі). Наприклад, замість загальної мети, організація може поставити конкретну, вимірювану ціль: «Зменшити вуглецевий слід продукту Х на 15% до кінця 2028 року шляхом переходу на перероблену сировину та оптимізації логістики». Такі цілі легко відстежувати, вони мотивують персонал і демонструють реальний прогрес зацікавленим сторонам.

Для проведення етапу «Реалізація», виходячи з пункту 7.4, виникає потреба у є розробці та підтримці процесів для внутрішньої та зовнішньої комунікації. Це не просто інформування, а двосторонній процес обміну достовірною та релевантною інформацією. В епоху підвищеної уваги до «грінвошингу» (неправдивих «зелених» заяв), використання стандартизованих підходів до комунікації є критично важливим для підтримки довіри. Для цього можна застосовувати стандарт ISO 14063:2020 «Екологічне управління. Обмінювання екологічною інформацією. Настанови та приклади». Він надає загальні принципи (прозорість, достовірність, ясність), а також настанови щодо розробки екологічної комунікаційної політики та стратегії, ідентифікації цільових аудиторій та вибору відповідних інструментів для внутрішньої та зовнішньої комунікації. Крім того, стандарти серії ISO 14020:2022 регулюють конкретні інструменти комунікації з ринком – екологічні маркування та декларації, які допомагають споживачам та бізнес-партнерам робити усвідомлений вибір.

Виходячи з вимог пункту 8.1, виникає необхідність у впровадженні процесів з урахуванням перспективи життєвого циклу на основі принципів економіки, що спрямовані на мінімізацію відходів та максимальне збереження цінності ресурсів. Для забезпечення цієї вимоги стандарт ISO 14009:2020 «Environmental management systems – Guidelines for incorporating material circulation in design and development» являється ключовим документом для

інтеграції циркулярності на етапі проектування. Він надає настанови щодо рішень і дій, спрямованих на підвищення матеріальної ефективності, таких як: оптимізація типу та кількості матеріалів у виробі; подовження терміну служби виробів (ремонтпридатність, довговічність) та забезпечення можливості відновлення виробів, компонентів та матеріалів наприкінці життєвого циклу. Крім того, стандарт ISO 14051:2011 «Екологічне управління. Обліковування витрат, пов'язаних із матеріальними потоками. Загальні принципи та структура» пропонує потужний інструмент – облік витрат на матеріальні потоки (Material Flow Cost Accounting, MFCA). Ця методологія відстежує потоки матеріалів у фізичних одиницях (кг, літри) та одночасно їх відповідні витрати (вартість сировини, енергії, обробки тощо). На відміну від традиційного обліку, де вартість відходів часто прихована в загальних накладних витратах, MFCA чітко показує, скільки коштів організація втрачає у вигляді відходів. Це перетворює екологічну проблему (відходи) на фінансову можливість (економія), що є потужним стимулом для оптимізації процесів.

Для забезпечення готовності до надзвичайних ситуацій (п. 8.2) виникає необхідність у визначенні потенційно надзвичайних ситуацій, які можуть мати екологічні наслідки, та розробити плани реагування на них. Для цього можна застосувати серію стандартів ISO 31000, яка допомагає систематично ідентифікувати потенційні аварійні ситуації (наприклад, розливи хімікатів, пожежі, відмови очисного обладнання) як ризики з високим ступенем тяжкості. Крім того, аналіз кліматичних ризиків за стандартами ISO 14090/14091 є критично важливим для ідентифікації надзвичайних ситуацій, пов'язаних з екстремальними погодними явищами, такими як повені, урагани, посухи або аномальна спека, які можуть призвести до технологічних аварій (так званих Natech – Natural-hazard-triggered technological accidents). Результати такого аналізу є прямим входним даним для розробки планів реагування, проведення навчань та забезпечення готовності до таких небезпечних подій.

На етапі «Оцінювання», відповідно до пункту 9.1 потрібно організаціям здійснювати моніторинг, вимірювання, аналіз та оцінку своєї екологічної дієвості. Щоб цей процес був ефективним, а не формальним, можна використати стандарт ISO 14031:2021 «Environmental management – Environmental performance evaluation – Guidelines». Він надає методологію для розробки та впровадження процесу оцінки екологічної дієвості (Environmental Performance Evaluation, EPE). Стандарт допомагає організації вибрати відповідні показники (індикатори) для відстеження, які поділяються на три групи. До першої відносяться показники управлінської дієвості (Management Performance Indicators, MPIs), які відображають зусилля керівництва (напр., кількість

годин навчання персоналу, обсяг інвестицій в екологічні проекти). До другої – показники операційної дієвості (Operational Performance Indicators, OPIs), що відображають ефективність процесів (напр., споживання енергії на одиницю продукції, кількість відходів на тонну сировини). До третьої – показники стану довкілля (Environmental Condition Indicators, ECIs) для відображення стану навколишнього середовища в зоні впливу організації.

Наступним важливим стандартом є ISO 14033:2019 «Екологічне управління. Кількісна екологічна інформація. Настанови та приклади». Він доповнює ISO 14031, надаючи детальні настанови щодо збору, обробки та представлення кількісних даних, щоб забезпечити їх точність, достовірність, порівнянність та прозорість. Використання зазначених нормативних документів дозволяє перетворити вимогу п. 9.1 з простого збору даних на повноцінну систему управління дієвістю, яка надає керівництву аналітику для прийняття обґрунтованих рішень.

Для проведення внутрішнього аудиту доцільно застосувати стандарт ISO 19011 «Настанови щодо здійснення аудитів систем управління». Ефективність процесів залежить від якості вхідної інформації, тому чіткість і відповідність результатів є ключовим елементом системи. Так, під час аналізу з боку керівництва, замість суб'єктивних оцінок, краще виконати *звіти про екологічну дієвість з конкретними показниками (згідно ISO 14031); дані обліку матеріальних потоків, що показують фінансові втрати від відходів (згідно ISO 14051); оновлені дані про ризики та можливості (згідно ISO 31000)*. Це робить аналіз з боку керівництва не формальною процедурою, а реальним управлінським процесом, заснованим на об'єктивних даних.

Для забезпечення верифікації результатів (даних) та звітності про результати обробки інформації рекомендується стандарт ISO 14016:2020 «Екологічне управління. Настанови щодо запевнення екологічних звітів». Стандарт встановлює загальні принципи та настанови для процесу верифікації будь-яких екологічних звітів. Він допомагає забезпечити систематичність, об'єктивність та надійність процесу перевірки, що підвищує довіру до кінцевого висновку верифікатора. Додатково можна скористатись серією стандартів ISO 14064, яка встановлює специфічні вимоги для звітності та верифікації у сфері парникових газів. Так, стандарт ISO 14064-3:2019 деталізує вимоги до процесу валідації (перевірки проектних даних) та верифікації (перевірки фактичних даних) звітів про парникові гази. Стандарт ISO 14065:2020 встановлює вимоги до органів, що проводять валідацію та верифікацію, забезпечуючи їх компетентність та неупередженість. При цьому стандарт ISO 14066:2023 визначає вимоги до компетентності самих команд валідаторів та верифікаторів. Разом ці стандарти створюють надійний ланцюжок довіри, де кожен елемент – від методики розрахунку до компе-

тентності аудитора – регулюється міжнародно визнаними правилами.

Останній етап «Поліпшення» вимагає від організації реагувати на невідповідності (п. 10.2) та постійно поліпшувати придатність, адекватність та результативність СЕМ (п. 10.3). Інформація, зібрана та проаналізована на етапі «Check» (за допомогою ISO 14031:2021, ISO 19011:2018 тощо), стає основою для даного етапу. Саме тут виявляються можливості для поліпшення, які потім лягають в основу нових екологічних цілей та планів дій на наступному витку циклу «PDCA». Таким чином, використання інструментальних стандартів на етапі оцінювання безпосередньо живить процес постійного поліпшення, роблячи його цілеспрямованим та заснованим на фактах, а не на припущеннях.

Результат аналізу залучення стандартів до забезпечення дієвої СЕМ наведено в табл. 2.

Обговорення. Система екологічного менеджменту в сучасному світі виходить далеко за межі простого дотримання законодавства [16]. Вона стає інструментом управління, що дозволяє не лише мінімізувати ризики, але й створювати нові конкурентні переваги та забезпечувати довгострокову стійкість і сталість розвитку організації. Стандарти розроблені технічним комітетом ISO/TC 207 та пропонують інструменти для повної інтеграції СЕМ у виробничі процеси, зокрема через фінансову оцінку та гнучкі підходи до впровадження [2, 16, 17].

Одним із найбільших викликів для екологічних менеджерів завжди була необхідність обґрунтувати інвестиції в природоохоронні заходи мовою, зрозумілою для вищого керівництва та фінансових директорів [18]. Два стандарти з портфеля ISO/TC 207 роблять революційний крок у цьому напрямку, дозволяючи перевести екологічні показники у фінансовий вимір. Це стандарт ISO 14007:2019 «Екологічне управління. Настанови щодо визначення екологічних витрат і вигод», який надає методологію для ідентифікації та кількісної оцінки екологічних витрат (напр., плата за забруднення, витрати на утилізацію відходів, вартість втрачених ресурсів) та вигод (напр., економія від зменшення споживання енергії, дохід від продажу вторинної сировини). Він також розглядає залежність організації від довкілля, наприклад, від природних ресурсів, що дозволяє оцінити пов'язані з цим ризики. Додатково існує стандарт ISO 14008:2019 «Грошове оцінювання впливів на довкілля та пов'язаних з ними екологічних аспектів», який іде ще далі. Він пропонує рамкову структуру для грошової оцінки не лише прямих витрат, але й зовнішніх ефектів – впливів на здоров'я людини та стан довкілля, спричинених діяльністю організації. Це дозволяє надати грошову оцінку таким явищам, як шкода від забруднення повітря або втрата біорізноманіття, що є критично важливим для комплексного аналізу ризиків та прийняття інвестиційних рішень.

**Відповідність стандартів серій ISO 14000, ISO 31000 та ISO 19000
до розділів стандарту ISO 14001:2015**

Розділ/пункт ISO 14001:2015	Ключова вимога (коротко)	Підтримуючий стандарт(и) ISO/TC 207 та суміжні	Роль підтримуючого стандарту
4. Середовище організації	Розуміння внутрішніх/зовнішніх чинників та потреб зацікавлених сторін.	ISO 14004, ISO 14090/14091 (після Amd 1:2024)	Надання настанов щодо аналізу контексту; надання методології для аналізу кліматичного контексту.
5. Лідерство	Демонстрація зобов'язань, розробка екологічної політики.	ISO 14004	Надання настанов щодо ролі вищого керівництва та змісту екологічної політики.
6.1. Ризики та можливості	Ідентифікація, аналіз та планування дій щодо ризиків та можливостей.	ISO 31000, ISO 14004, ISO 14090/14091	Надання рамкової структури для управління ризиками; настанови щодо процесу; методологія оцінки кліматичних ризиків.
6.1.2. Екологічні аспекти	Ідентифікація та оцінка значущих аспектів з урахуванням ЖЦ.	ISO 14040/14044, ISO 14006, ISO 14046, ISO 14067	Надання методології Оцінки Життєвого Циклу (ОЖЦ), екодизайну, оцінки водного та вуглецевого сліду.
6.1.3. Зобов'язання	Визначення та забезпечення доступу до законодавчих та інших вимог.	ISO 14004	Надання настанов щодо створення та підтримки реєстру вимог.
6.2. Екологічні цілі	Встановлення вимірних цілей та планування їх досягнення.	ISO 14031	Надання методології для розробки вимірних показників (індикаторів), що є основою для постановки цілей.
7.4. Комунікація	Налагодження внутрішньої та зовнішньої комунікації.	ISO 14063, серія ISO 14020	Надання настанов щодо стратегії комунікації; встановлення правил для екологічного маркування та декларацій.
8.1. Операційний контроль	Управління процесами для запобігання впливам, з урахуванням ЖЦ.	ISO 14006, ISO 14009, ISO 14051	Надання інструментів екодизайну, циркуляції матеріалів та обліку матеріальних потоків для операційного контролю.
8.2. Готовність до НС	Ідентифікація потенційних НС та розробка планів реагування.	ISO 31000, ISO 14090/14091	Допомога в ідентифікації НС через аналіз ризиків, зокрема кліматичних (повені, посухи).
9.1. Моніторинг, вимірювання	Оцінка екологічної дієвості та результативності СЕМ.	ISO 14031, ISO 14033	Надання методології оцінки екологічної дієвості (ЕРЕ) та забезпечення якості кількісних даних.
9.2. Внутрішній аудит	Проведення аудитів для перевірки відповідності та результативності.	ISO 19011	Надання настанов щодо принципів та процесу проведення аудитів систем управління.
9.3. Аналіз керівництвом	Періодичний аналіз СЕМ вищим керівництвом.	ISO 14004, ISO 14031	Надання настанов щодо вхідних даних для аналізу; забезпечення аналізу об'єктивними даними про дієвість.
10. Поліпшення	Вжиття коригувальних дій та постійне поліпшення СЕМ.	ISO 14004	Надання настанов щодо процесу поліпшення як невід'ємної частини циклу PDCA.

Застосування зазначених стандартів руйнує стіну між «екологічним» та «фінансовим» напрямками в організації. Вони дозволяють обґрунтовувати екологічні ініціативи як інвестиції з конкретним поверненням (ROI) через економію ресурсів, а не як витрати щодо зменшення штрафів та зниження довгострокових фінансових ризиків [19].

Для малих та середніх підприємств з обмеженими ресурсами впровадження повноцінної СЕМ за ISO 14001:2015 може здаватися надто складним та витратним завданням. Розуміючи це, ISO розробило стандарт ISO 14005:2019 «Системи екологічного управління. Настанови щодо гнучкого підходу до поетапного запровадження». Стандарт пропонує гнучку, поетапну модель, яка дозволяє організаціям розбудовувати свою СЕМ крок за кроком, досягаючи проміжних результатів та отримуючи вигоди на кожному етапі. Організація може почати з найбільш пріоритетних для неї екологічних аспектів, поступово розширюючи сферу застосування та поглиблюючи систему, доки не досягне повної відповідності вимогам ISO 14001:2015 [20]. Такий підхід робить екологічний менеджмент значно доступнішим для МСП, дозволяючи їм рухатися у власному темпі та демонструвати прогрес зацікавленим сторонам [4, 20].

Аналіз портфеля стандартів технічного комітету ISO/TC 207 дозволяє сформулювати ключові рекомендації для організацій, що прагнуть до результативного екологічного менеджменту. Розглядаючи СЕМ як стратегічний інструмент, можна її інтегрувати в загальну стратегію щодо здійснення процесу керування ризиками та прийняття рішень на найвищому рівні. При цьому зручно використати стандарти ISO 14007:2019 та ISO 14008:2019 для переведення екологічних показників у фінансовий вимір, щоб дієво комунікувати з керівництвом та інвесторами для прийняття відповідних рішень щодо екологічних проектів.

Зазначимо, що діяльність технічного комітету ISO/TC 207 є динамічною і відображає глобальні пріоритети. Майбутні тенденції у стандартизації, ймовірно, будуть зосереджені на таких напрямках як економіка і екологія. Зараз відбувається завершення розробки та публікація стандартів серії ISO 59000, які створять комплексну базу для переходу до сучасних бізнес-моделей. Також напрямок «Зелені» та стійкі фінанси. Це стає зрозумілим, тому що відбувається швидкий розвиток стандартів ISO 14030:2021 (зелені боргові інструменти), ISO 14097:2021 (звітність про інвестиції, пов'язані з кліматом) та ISO 14100:2022 (критерії для зелених

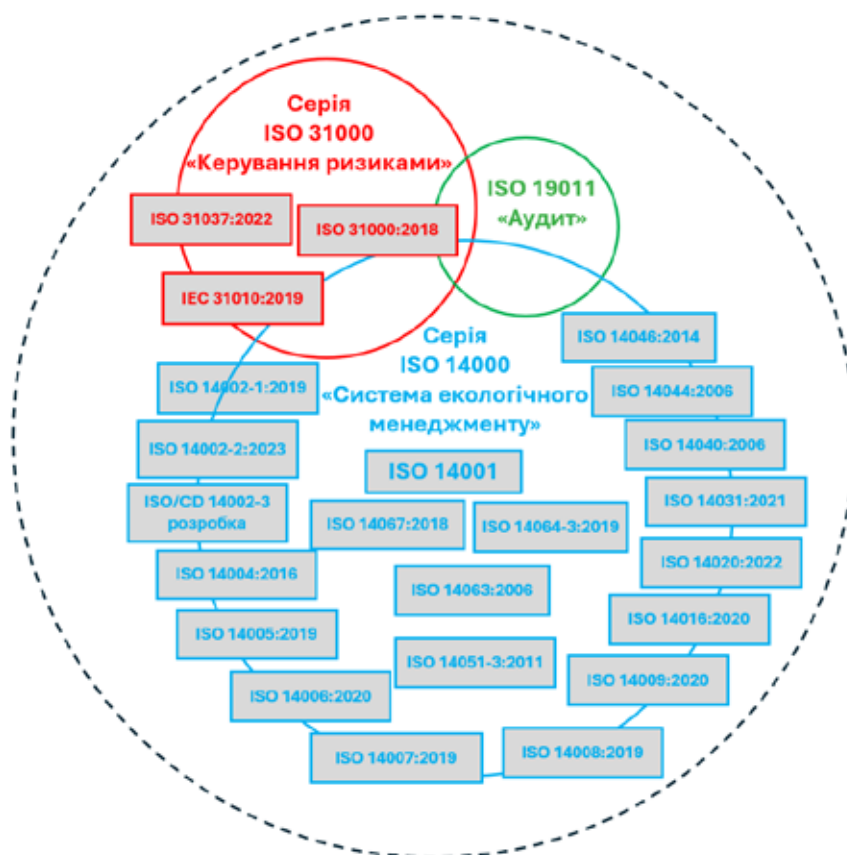


Рис. 3. Інтеграція стандартів серій ISO 14000, ISO 31000:2018 та ISO 19011:2018 в системі екологічного менеджменту

фінансових проєктів), посилить зв'язок між екологічною дієвістю та доступом до фінансів. Цікавим викликом являється напрямок «Біорозманіття та природний капітал». В його основі стандарт ISO 14054, що знаходиться на стадії розробки. При цьому облік природного капіталу дозволить організаціям краще розуміти та оцінювати свою залежність та вплив на екосистеми. Останнім напрямом є «Подальша деталізація кліматичних дій». Очікується подальший розвиток стандартів, що деталізують аспекти пом'якшення та адаптації до зміни клімату, зокрема публікація ISO 14068-1:2023 про вуглецеву нейтральність.

Організації, які будуть відстежувати ці тенденції та проактивно інтегрувати нові підходи, зможуть не лише забезпечити відповідність майбутнім вимогам, але й отримати значні стратегічні переваги, зміцнюючи свою стійкість, сталість та конкурентоспроможність у світі, що швидко змінюється [21, 22].

Висновки

1. Вдосконалено систему екологічного менеджменту згідно вимог стандарту ISO 14001:2015, який виступає у вигляді рамкової структури, що наповнюється практичними інструментами, виходячи із вимог допоміжних стандартів серії ISO 14000, а також суміжних стандартів, зокрема серії стандартів ISO 31000:2018, що дозволяє не лише виконати

вимоги, а створити потужну основу для постійного поліпшення.

2. Встановлено чіткий взаємозв'язок між етапами циклу PDCA та вимогами ISO 14001, які додатково посилюються оцінюванням ризиків відповідно до стандарту ISO 31000, з урахуванням оцінювання життєвого циклу відповідно до ISO 14040/44, розробкою екодизайну на основі ISO 14006:2020, оцінюванням дієвості, виходячи з вимог ISO 14031:2021, створенням умов екологічної комунікації згідно ISO 14063:2020, серія ISO 14020:2022, фінансової оцінки, виходячи з ISO 14007/8:2019/2020 та принципами циркулярної економіки, що описується стандартами ISO 14009:2020, ISO 14051:2011.

3. Запровадження інтеграції різних стандартів серії ISO 14000 дозволяє перетворити СЕМ з центру витрат на інструмент створення додаткової цінності організації, що сприяє не лише зменшенню негативного впливу на довкілля, але й досягненню прямих економічних зисків через оптимізацію ресурсів, мінімізацію відходів, зниження фінансових ризиків та підвищення конкурентоспроможності.

4. Подальший розвиток СЕМ передбачає зосередження на економіці, «зелених» фінансах, біорізноманітті та подальшій деталізації кліматичних дій, з урахуванням впливу проактивності як ключової умови для довгострокової стійкості, сталості та успіху бізнесу в сучасному світі.

Література

1. Hu, Q. Research on Relationship Between Environmental Performance and Financial Performance of Chinese Listed Companies. *China Popul. Resour. Environ.* 2012, vol. 22, pp. 23–32.
2. Zhang, H., Zhang, C., & Pei, X. Research on Environmental Management System Certification and Corporate Environmental Performance. *Chin. J. Manag.* 2020, vol. 17, pp. 1043–1051.
3. Jin, Y. Research on performance evaluation of software industry based on EVA. *Bus. Inf.* 2021, vol. 39, pp. 7–9.
4. Zhang, Q., & Ma, Y. The impact of environmental management on firm economic performance: The mediating effect of green innovation and the moderating effect of environmental leadership. *J. Clean. Prod.* 2021, vol. 292, p. 126057.
5. Petrová, E., Štofá, T., & Šoltés, M. Exploration of the Factors that Influence the Implementation of Environmental Management Systems—The Case of Slovakia. *Economies*, 2021, vol. 9, no. 2, p. 68. Available at: <https://doi.org/10.3390/economies9020068>
6. Bielski, S., Zielińska-Chmielewska, A., & Marks-Bielska, R. Use of Environmental Management Systems and Renewable Energy Sources in Selected Food Processing Enterprises in Poland. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 11, p. 3212. Available at: <https://doi.org/10.3390/en14113212>
7. Feng, K., & Bao, C. The Impact of Environmental Management Capabilities on the Economic Value Added of Industrial Enterprises—Empirical Evidence from China. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 8, p. 3356. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16083356>
8. Cheong, F., & Lee, Y.-H. Developing an Environmental Management System for Evaluating Green Casino Hotels. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 14, p. 7825. Available at: <https://doi.org/10.3390/su13147825>
9. Šebo, J., Prester, J., & Šebová, M. The Role of Environmental Management Systems and Energy Management Systems in the Adoption of Energy Recuperation Technologies in Central European Manufacturing Companies. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 24, p. 16913. Available at: <https://doi.org/10.3390/su152416913>
10. Voinea, C.L., Hoogenberg, B.-J., Fratostiteanu, C., & Bin Azam Hashmi, H. The Relation between Environmental Management Systems and Environmental and Financial Performance in Emerging Economies. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 13, p. 5309. Available at: <https://doi.org/10.3390/su12135309>
11. Yue, G., Wei, H., Khan, N.U., Saufi, R.A., Yaziz, M.F.A., & Bazkiaei, H.A. Does the Environmental Management System Predict TBL Performance of Manufacturers? The Role of Green HRM Practices and OCBE as Serial Mediators. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 3, p. 2436. Available at: <https://doi.org/10.3390/su15032436>
12. Díaz de Junguitu, A., & Allur, E. The Adoption of Environmental Management Systems Based on ISO 14001, EMAS, and Alternative Models for SMEs: A Qualitative Empirical Study. *Sustainability*, 2019, vol. 11, no. 24, p. 7015. Available at: <https://doi.org/10.3390/su11247015>
13. Boiral, O., Guillaumie, L., Heras-Saizarbitoria, I., & Tayo Tene, C.V. Adoption and outcomes of ISO 14001: A systematic review. *Int. J. Manag. Rev.*, 2018, vol. 20, pp. 411–432.

14. Islam, T., Hussain, D., Ahmed, I., & Sadiq, M. Ethical leadership and environment specific discretionary behaviour: The mediating role of green human resource management and moderating role of individual green values. *Can. J. Adm. Sci./Rev. Can. Des Sci. De L'administration*, 2021, vol. 38, pp. 442–459.
15. Expert Methods in Automated Control Systems: Formation and Directions of Use of Expert Knowledge: [Electronic Resource]: Textbook for Students of Specialty 151 «Automation and Computer-Integrated Technologies» / Igor Sikorsky KPI; compiled by L. D. Yaroshchuk. – 2nd ed., Revised. – Electronic text data (1 file: 0.90 MB). – Kyiv: Igor Sikorsky KPI, 2022. – 43 p.
16. Allur, E., Heras-Saizarbitoria, I., Boiral, O., & Testa, F. Quality and Environmental Management Linkage: A Review of the Literature. *Sustainability*, 2018, vol. 10, p. 4311.
17. Heras, I., & Arana, G. Alternative Models for Environmental Management in SMEs: The Case of Ekoscan vs. ISO 14001. *J. Clean. Prod.*, 2010, vol. 18, pp. 726–735.
18. Cui, C., & Wang, L. An Empirical Study on the Impact of Environmental Accounting Information Disclosure Quality on Enterprise Value—A Case Study of Mining Listed Companies. *Res. Financ. Account.*, 2017, vol. 38, pp. 49–56.
19. Feng, K., & Bao, C. The Impact of Environmental Management Capabilities on the Economic Value Added of Industrial Enterprises—Empirical Evidence from China. *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 8, p. 3356. Available at: <https://doi.org/10.3390/su16083356>
20. Van Kranenburg, H., & Voinea, C.L. Nonmarket Strategies Predictors for Foreign Firms. *Scand. J. Manag.*, 2017, vol. 33, pp. 82–92.
21. Lv, J., & Han, K. Impact of Environmental Performance on Financial Performance of Coal Enterprises Under Strong Environmental Constraints. *Coal Eng.*, 2020, vol. 52, pp. 188–192.
22. Zhang, Q., & Ma, Y. The Impact of Environmental Management on Firm Economic Performance: The Mediating Effect of Green Innovation and the Moderating Effect of Environmental Leadership. *J. Clean. Prod.*, 2021, vol. 292, p. 126057.

Дата першого надходження рукопису до видання: 22.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ПИТАННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

УДК 504.062:711.4(477.83-22)

СУЧАСНИЙ СТАН ОЗЕЛЕНЕННЯ МІСТА ІВАНО-ФРАНКІВСЬК У КОНТЕКСТІ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАЛОСТІ: ПРОБЛЕМИ, ВИКЛИКИ ТА СТРАТЕГІЧНІ НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

Бойчук В.Б., Різничук Н.І.

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
вул. Шевченка, 57, 77008, м. Івано-Франківськ
vasyl.boichuk@pnu.edu.ua, nadiia.riznychuk@pnu.edu.ua

У статті здійснено комплексний аналіз сучасного стану озеленення міста Івано-Франківськ у контексті забезпечення екологічної сталості урбанізованого середовища. Акцентовано увагу на ролі зелених насаджень як ключового елементу міської екосистеми, що забезпечує регуляцію мікроклімату, очищення повітря, зменшення рівня шуму, поглинання вуглекислого газу, збереження біорізноманіття та загальне підвищення якості життя міського населення. Визначено функціональне значення різних типів озеленення, зокрема парків, скверів, алей, зелених зон загального користування та декоративного озеленення прибудинкових територій. Проведено просторово-структурний аналіз існуючої зеленої інфраструктури міста із використанням відкритих геоінформаційних даних, що дозволило виявити дисбаланс у розподілі зелених зон між різними районами. Встановлено, що головними чинниками погіршення стану зелених насаджень є інтенсивна урбанізація, недосконале міське планування, вплив кліматичних змін, скорочення площі зелених зон унаслідок забудови, а також недостатній рівень муніципального управління у сфері озеленення.

У ході дослідження проаналізовано наявну нормативно-правову базу, яка регламентує процеси озеленення в містах України, зокрема в контексті децентралізації та змін у законодавстві щодо використання міських земель. Виявлено невідповідність між сучасними екологічними викликами та застарілими підходами до планування і догляду за зеленими насадженнями. Окрему увагу приділено впровадженню концепції «зеленої інфраструктури», яка передбачає інтеграцію природних елементів у міське середовище з метою підвищення його стійкості до зовнішніх впливів. Розглянуто приклади успішного озеленення у європейських містах, які можуть бути адаптовані до українських умов.

У статті обґрунтовано стратегічні напрями сталого розвитку зеленого каркасу міста, серед яких: інтеграція екологічних підходів у містобудівну політику, впровадження сучасних технологій управління зеленими насадженнями, активізація участі громадськості, посилення екологічної освіти та формування екологічної свідомості у населення. Запропоновано практичні рекомендації щодо адаптації міської зеленої інфраструктури до сучасних екологічних викликів із урахуванням принципів сталого розвитку, а також посилення ролі муніципального управління у формуванні довгострокових екологічних стратегій. Узагальнено перспективи впровадження інноваційних підходів в озелененні міста задля створення комфортного, безпечного та екологічно стабільного урбанізованого простору. *Ключові слова:* урбаністичне озеленення, декоративне озеленення, зелені насадження, міське середовище, екологічна стійкість, зелена інфраструктура, Івано-Франківськ, біорізноманіття, зміни клімату.

The current state of urban greening in Ivano-Frankivsk in the context of ecological sustainability: problems, challenges and strategic development directions. Boichuk V., Riznychuk N.

The article presents a comprehensive analysis of the current state of urban greening in the city of Ivano-Frankivsk in the context of ensuring the ecological sustainability of the urban environment. The focus is placed on the role of green spaces as a key element of the urban ecosystem, contributing to microclimate regulation, air purification, noise reduction, carbon dioxide absorption, biodiversity conservation, and overall improvement in the quality of life for urban residents. The functional significance of various types of green spaces is defined, including parks, squares, alleys, public green areas, and ornamental landscaping of residential areas. A spatial-structural analysis of the city's existing green infrastructure is conducted using open geoinformation data, which revealed an imbalance in the distribution of green zones across different districts. It is established that the main factors contributing to the degradation of green spaces are intensive urbanization, inadequate urban planning, the impact of climate change, reduction of green areas due to construction, and insufficient municipal management in the field of landscaping.

The study also analyzes the existing legal and regulatory framework governing urban greening processes in Ukraine, particularly in the context of decentralization and legislative changes regarding urban land use. A mismatch is identified between current environmental challenges and outdated approaches to the planning and maintenance of green spaces. Particular attention is given to the implementation of the "green infrastructure" concept, which involves integrating natural elements into the urban environment to increase its resilience to external influences. The article examines successful greening practices in European cities that could be adapted to Ukrainian conditions.

The article substantiates strategic directions for the sustainable development of the city's green framework, including the integration of ecological approaches into urban planning policy, the implementation of modern technologies for managing green spaces, increased public participation, strengthening of environmental education,

and the development of ecological awareness among the population. Practical recommendations are proposed for adapting the urban green infrastructure to current environmental challenges based on sustainable development principles, as well as for enhancing the role of municipal governance in shaping long-term environmental strategies. The prospects for introducing innovative approaches to urban greening aimed at creating a comfortable, safe, and ecologically stable urban environment are summarized. *Key words:* urban greening, ornamental landscaping, green plantings, urban environment, ecological sustainability, green infrastructure, Ivano-Frankivsk, biodiversity, climate change.

Постановка проблеми. Сучасні урбанізаційні тенденції значною мірою трансформують екологічний баланс міст, що створює потребу у переосмисленні ролі зелених зон як структурного елементу стійкого міського простору. Зростання щільності забудови, кліматичні аномалії та фрагментація природного ландшафту сприяють погіршенню екологічного стану міського середовища. У зв'язку з цим особливого значення набуває оцінка та стратегічне планування міського озеленення як ключового елементу «зеленої інфраструктури».

Актуальність дослідження. Актуальність обумовлена необхідністю досягнення цілей сталого розвитку, задекларованих в національних і міжнародних стратегіях, включно з Паризькою кліматичною угодою та Програмою ООН «Зелені міста». Озеленення міських просторів розглядається як інструмент для досягнення екологічної рівноваги в умовах антропогенного навантаження, особливо в контексті малих і середніх міст, таких як Івано-Франківськ.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження узгоджується з пріоритетними науковими напрямками в галузі урбаністики, екології та сталого просторового розвитку. Авторське бачення базується на концепції інтегрованого управління міськими екосистемами та практичних потребах муніципального планування зелених територій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання міського озеленення розглядалися у працях як українських, так і іноземних дослідників, зокрема в контексті урбанізації, зміни клімату та екологічної стійкості.

Так, О.М. Гудзенко досліджує вплив урбанізації на зелену інфраструктуру в українських містах, зокрема звертаючи увагу на фрагментацію зелених зон, зменшення площ природних екосистем та порушення екологічної рівноваги внаслідок хаотичної забудови [1].

А. Лисенко аналізує екологічну стійкість міського середовища в умовах кліматичних змін, підкреслюючи необхідність інтеграції зелених зон у просторове планування міст, зокрема для регуляції мікроклімату та зменшення теплового ефекту міських територій [2].

У публікаціях Європейського агентства з навколишнього середовища наголошується на критичному значенні зеленої інфраструктури для адаптації міст до кліматичних викликів. Згідно з досліджен-

нями агентства, парки, дерева вздовж вулиць і зелені коридори не лише знижують температуру повітря, а й зменшують ризики повеней і сприяють біорізноманіттю [3].

Концепція «Зелене місто» також містить огляд проблем і перспектив розвитку зелених насаджень в українських містах, зокрема пропонує підходи до управління екосистемними послугами та участі громад у прийнятті екологічних рішень [4].

Попри наявність фундаментальних досліджень, існує брак комплексного аналізу стану озеленення саме середніх міст Західної України, зокрема таких як Івано-Франківськ. Локальні звіти, зокрема моніторингові дані ІФНТУНГ, вказують на нерівномірний розподіл зелених насаджень по районах міста та загрозу подальшої деградації зелених зон через інтенсивне будівництво [5].

Додатково, інструменти просторового аналізу – такі як Google Earth Pro та OpenStreetMap – дозволяють візуалізувати зміни у зеленому покритті міста в динаміці, що дає змогу виявити зони ризику та потенціал для екологічної реконструкції [6, 7].

Водночас відкриті дані Івано-Франківської міської ради дозволяють проводити первинний аналіз міських зелених насаджень, однак ці дані потребують верифікації та доповнення геопросторовими дослідженнями [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Необхідним є уточнення просторово-функціональної структури озеленення, систематизація проблем догляду та збереження біорізноманіття в умовах змін клімату, а також розробка ефективної стратегії міського зеленого розвитку.

Новизна. Уперше проведено системне поєднання просторового аналізу, екологічної оцінки та стратегічного планування озелених територій Івано-Франківська. Запропоновано власну модель розвитку зеленої інфраструктури міста з урахуванням сучасних кліматичних та урбаністичних викликів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методика дослідження базується на використанні геоінформаційного аналізу (OpenStreetMap, Google Earth), порівняльного підходу до оцінки озеленення в різних містах України, екологічного моніторингу стану насаджень, аналізу нормативно-правових документів та муніципальних стратегій. Результати можуть бути застосовані в практиці просторового планування, муніципального управління та екологічного аудиту.

Виклад основного матеріалу. Проаналізовано структуру зелених насаджень міста: парки, сквери, лісопаркові території, прибережні зони. Встановлено, що рівень озеленення становить лише 14% від площі міста, що нижче за рекомендовані екологічні стандарти. Визначено головні виклики: урбанізаційний тиск, кліматичні зміни, деградація старих насаджень. Проведено порівняльний аналіз з іншими містами (Львів, Київ, Харків). Запропоновано стратегічні напрями: формування екологічної мережі, цифрова інвентаризація, адаптація до клімату, громадська участь.

У даному розділі здійснено багаторівневий аналіз стану озеленення міста Івано-Франківськ, що включає кількісну оцінку площ озелених територій, їхню функціональну структуру, екологічні характеристики, проблемні зони, а також виявлення головних викликів і пропозиції щодо стратегічного розвитку. Матеріал базується на синтезі даних муніципального обліку, супутникових знімків, відкритих картографічних джерел, екологічних досліджень та практики управління зеленими зонами.

1. Просторово-кількісна характеристика зелених насаджень міста. На території Івано-Франківська, за останніми даними (2024), функціонує понад 1120 га озелених площ, що становить близько 14% території міста. Цей показник є нижчим за середній рівень для європейських міст (оптимум: 20–40%), що вказує на недостатню густоту зелених насаджень, особливо у щільно забудованих районах.

Структуру зелених територій наведено у таблиці 1.

Найбільш значущі об'єкти включають Парк культури і відпочинку ім. Т. Шевченка, Міський парк Молодіжний, сквер Міцкевича, міський лісовий масив на південному заході міста, а також прибережні зони річок Бистриця Солотвинська та Бистриця Надвірнянська.

2. Екологічне та клімато-регульовальне значення зелених зон. Зелені зони є важливими компонентами міської екосистеми, виконуючи ряд критичних екологічних функцій:

– Регулювання мікроклімату. Наявність зелених насаджень сприяє зменшенню температури повітря влітку до 3–5°C у порівнянні з урбанізованими поверхнями. Деревя і чагарники виконують функцію

теплого буфера, що значно знижує ефект міського «острова спеки». Особливо це актуально для центральних і щільно забудованих районів міста (вул. Грушевського, Незалежності, Південний бульвар).

– Поглинання забруднювачів. Оцінки свідчать, що 1 га зелених насаджень у межах міста щорічно здатен поглинути:

до 100 кг діоксиду сірки,
350 кг пилу,
до 70 кг оксидів азоту,
значну кількість CO₂ (≈5 тонн).

Це особливо важливо в зонах інтенсивного автотрафіку та поблизу промислових підприємств (район вул. Крайківського, Хіміків, Тролейбусна).

– Збереження біорізноманіття. В озелених територіях міста налічується:

понад 250 видів вищих рослин (близько 40% – аборигенні),

130 видів хребетних тварин,

12 видів, занесених до Червоної книги України (наприклад, кажан пізній, вивільга звичайна).

Ці зони виконують функцію екологічних ніш, міграційних коридорів та репродуктивних ареалів для птахів і комах.

3. Урбанізаційні загрози та проблемні зони.

– Урбанізаційний тиск. Розвиток нових житлових мікрорайонів («Каскад», «Позитрон», «Пасічна», с. Угорники) часто не супроводжується пропорційним створенням нових зелених зон. Це призводить до фрагментації зеленого каркасу міста та погіршення екосистемної цілісності.

– Стан зелених насаджень. Значна частина дерев у парках і скверах має вік понад 40–60 років, що свідчить про старіння насаджень. Відсутність планової заміни, санітарної обрізки та інвентаризації призводить до: всихання дерев, підвищення ризику ураження шкідниками (короїди, омела), зниження декоративної та санітарної цінності.

– Нерівномірність розподілу зелених зон. Картографічний аналіз (Google Earth, OSM) виявляє дефіцит зелених зон у східній частині міста, зокрема: новобудови на вулиці Івасюка, Хоткевича, мікрорайон «Пасічна» (низький індекс NDVI), житлові комплекси з відсутністю повноцінного дворового озеленення.

4. Порівняльний аналіз з іншими містами наведено у таблиці 2.

Таблиця 1

Зелений фонд міста

№ п/п	Тип зелених насаджень	Площа (га)	Частка (%)
1	Парки, сквери	310	27,7
2	Лісопаркові території	440	39,3
3	Прибережні насадження	100	8,9
4	Захисні смуги	90	8,0
5	Озеленення біля житлових будинків	180	16,1

Таблиця 2

Частка зелених насаджень у деяких містах України

№ п/п	Місто	Частка зелених зон (%)	Стратегія озеленення
1	Київ	≈24	Є (затверджена 2021)
2	Львів	≈18	Є (від 2022 року)
3	Харків	≈19	Часткова реалізація
4	Івано-Франківськ	≈14	В процесі розробки

Івано-Франківськ демонструє нижчий показник, але має потенціал швидкого поліпшення ситуації завдяки компактності міської території, наявності природних ресурсів (річки, лісопарки) та активності громади.

5. Стратегічні напрями розвитку.

– Формування екологічної мережі міста. Необхідно поєднати парки, сквери, прибережні насадження та лісові зони в єдину зелену інфраструктуру через екологічні коридори (уздовж вулиць, набережних, між мікрорайонами).

– Проведення інвентаризації насаджень. Створення єдиного електронного реєстру дерев, з геопозиціонуванням, станом, видом і рекомендаціями щодо догляду. Відкритий доступ – підвищення прозорості.

– Озеленення нових забудов. Встановлення обов'язкового відсотку озеленення (не менше 25%) при будівництві нових ЖК, бізнес-центрів, інфраструктурних об'єктів.

– Використання кліматично стійких видів. Садіння місцевих видів, стійких до посух, вітрів та забруднення: дуб звичайний, дуб скельний, граб звичайний, горобина звичайна, гледичія.

– Громадська участь. Розвиток програм «Сади громади», «Зелені школи», інтеграція волонтерських ініціатив, екопросвіта молоді.

6. Прогноз розвитку до 2030 року (модель). Цільовий показник:

– підвищити частку зелених зон до 20% площі міста;

– забезпечити доступ до парку в радіусі 300–500 м для 90% населення;

– досягти індексу NDVI > 0.3 для кожного мікрорайону.

Головні висновки. Міська зелена інфраструктура Івано-Франківська виконує важливі екологічні, соціальні та кліматичні функції.

Сучасний стан озеленення потребує оновлення та стратегічного планування.

Існує потенціал для інтеграції екологічних вимог у просторове планування міста.

Необхідне комплексне фінансування, громадська участь і адаптаційні заходи.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути використані органами місцевого самоврядування для:

– розробки Стратегії сталого озеленення до 2030 року;

– обґрунтування зон для нових зелених насаджень;

– планування адаптаційних заходів до кліматичних змін;

– включення екологічних критеріїв до містобудівної документації;

– освітніх та екопросвітницьких кампаній.

Література

- Гудзенко О. М. Урбанізація та зелені зони: приклади міст України. *Екологічна географія*. 2022. № 3. С. 45–52.
- Лисенко А. Екологічна стійкість міського середовища в умовах кліматичних змін. *Екологія та урбаністика*. 2021. № 2. С. 34–40.
- European Environment Agency. *Green Infrastructure and Climate Adaptation*. Luxembourg: Publications Office of the EU, 2020.
- Європейський банк реконструкції та розвитку. *Концепція «Зелене місто»: Україна*. 2021.
- ІФНТУНГ. Кафедра екології. Звіт з моніторингу стану зелених насаджень Івано-Франківська. 2023.
- OpenStreetMap contributors. OpenStreetMap. www.openstreetmap.org
- Google Earth Pro (2024). Супутникові знімки Івано-Франківська.
- Івано-Франківська міська рада. Відкриті дані. <https://data.if-rada.gov.ua>

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

РОЗВИТОК УРБАНІЗАЦІЇ ТА ВИКЛИКИ ЕКОЛОГІЇ ЛЮДИНИ: ШЛЯХИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ ЕКОУПРАВЛІННЯ УКРАЇНСЬКИХ МІСТ ПОЄННОГО ПЕРІОДУ

Коробчук Л.І.

Луцький національний технічний університет

вул. Львівська, 75, 43000 м. Луцьк

luda.iv13a@gmail.com,

У статті розглядається розвиток сучасної урбанізації з акцентом на позитивні й негативні її риси, екологічні загрози міському середовищу та здоров'ю місцевих мешканців. Проаналізовано хто з вітчизняних науковців досліджував тему розвитку урбанізації та екологічних проблем, пов'язаних з нею. Відмічено, що міське середовище найпотужнішого навантаження зазнає від антропогенного чинника, а саме: збільшення чисельності автопарку; забруднення атмосферного повітря, поверхневих вод, ґрунтів; забруднення довкілля внаслідок роботи підприємств; із розвитком урбанізації в багатьох містах постає реальна загроза забезпечення населення якісною питною водою та ефективною роботою водовідведення й очищення стічних побутових вод; інтенсивна забудова міста зменшує площі озеленення, змінює мікроклімат і урбосистему; в низці українських міст гостро постає питання утилізації твердих побутових відходів; спостерігається динаміка зросту захворювань серед мешканців, спричинених нераціональним харчуванням, зокрема «фаст-фудом». Оригінальність дослідження полягає в запропонованих розробках комплексного підходу для оцінки екологічного стану міського середовища, котра охоплює природно-ресурсний потенціал, антропогенне навантаження, екологічне управління міським довкіллям та рекомендацій природоохоронних заходів для розвитку урбанізації, основані на окремих угрупованнях: формування екологічної культури місцевих мешканців, модернізація громадського простору, соціально-орієнтовані ініціативи, програми розвитку міста, удосконалення міської інфраструктури. Дотримання запропонованих підходів є шляхом уперед для формування екологічно збалансованих систем міського середовища, а також обґрунтованою необхідністю впровадження інтегрованих природоохоронних заходів для досягнення сталого розвитку міст у післявоєнний період. *Ключові слова:* урбанізація, екологія людини, сталий розвиток, міське середовище, моніторинг, екологічне управління, антропогенне навантаження, урбосистема.

Development of urbanization and challenges of human ecology: ways of ensuring sustainable development of eco-management of Ukrainian cities during the war period. Korobchuk L.

The article examines the development of modern urbanization with an emphasis on its positive and negative features, environmental threats to the urban environment and the health of local residents. It was analyzed which of the domestic scientists researched the topic of the development of urbanization and the environmental problems associated with it. It was noted that the urban environment is most heavily stressed by the anthropogenic factor, namely: the increase in the number of vehicles; pollution of atmospheric air, surface waters, soils; environmental pollution due to the work of enterprises; with the development of urbanization in many cities, there is a real threat to providing the population with high-quality drinking water and effective work of drainage and wastewater treatment; intensive construction of the city reduces the areas of greening, changes the microclimate and urban system; in a number of Ukrainian cities, the issue of disposal of solid household waste is acute; the dynamics of the growth of diseases among residents caused by irrational nutrition, in particular "fast food", is observed. The originality of the research lies in the proposed development of a comprehensive approach to assessing the ecological state of the urban environment, which covers natural resource potential, anthropogenic load, ecological management of the urban environment, and recommendations for environmental protection measures for the development of urbanization, based on individual groups: formation of ecological culture of local residents, modernization of public space, socially oriented initiatives, city development programs, improvement of city infrastructure. Adherence to the proposed approaches is the way forward for the formation of ecologically balanced systems of the urban environment, as well as the justified need for the implementation of integrated environmental protection measures to achieve sustainable development of cities in the post-war period. *Key words:* urbanization, human ecology, sustainable development, urban environment, monitoring, environmental management, anthropogenic load, urban system.

Міське середовище характеризується значним впливом комплексу антропогенних факторів, котрі негативно впливають як на здоров'я людини, так і на функціонування природних компонентів урбанізованих територій. Це призводить до порушення екологічної рівноваги та формування штучно модифікованих умов проживання в межах міста.

Актуальність теми полягає в тому, що сучасні процеси урбанізації потребують належної оптимізації, яка має базуватися на раціональному екологічному управлінні функціональними та просторовими

структурами міста з обов'язковим урахуванням систематичного екологічного моніторингу стану навколишнього середовища в межах урбанізованих територій.

Наукова значущість проблеми зумовлена тим, що урбанізація як історичне явище має різні прояви, темпи та характеристики. Водночас населення, котре поступово інтегрується в міське середовище, набуває своїх характерних рис – специфічного способу життя, форм міських соціальних та професійних зв'язків, демографічної структури, типів розселення

та просторового розміщення промислової інфраструктури.

Питаннями розвитку урбанізації та її впливу на довкілля займалися різні українські науковці: у своїх дослідженнях О. І. Лежнев, Г. М. Желновач та С. В. Очеретенко [3] аналізують шумове забруднення як один із проявів антропогенного впливу на міське середовище, а також вивчають зміну стану атмосферного повітря в рекреаційних зонах міст під впливом інтенсивного автотранспортного руху. Питання правової неузгодженості в сфері містобудівного регулювання, а також недостатнє впровадження екологічних стандартів у процеси розвитку міських урбаністичних систем стали предметом досліджень П. Ю. Машіки, Н. І. Петрецької та В.В. Ковача [4]. Л. В. Сергієнко [8] у своїх наукових працях аналізував екологічні наслідки урбанізаційних процесів у контексті загроз для безпеки урбанізованих територій та їх населення. Дослідження В. С. Цигоди [9] було зосереджене на вивченні специфіки розвитку сучасних міських агломерацій в умовах активної урбанізації та змін у соціально-економічних відносинах в Україні.

Аналіз актуальних наукових публікацій засвідчує, що разом із позитивними результатами урбанізаційних процесів дедалі відчутнішими стають нові соціальні та екологічні загрози, котрі мають тенденцію до ускладнення в майбутньому та потребують оперативного реагування.

Наукова новизна представленого дослідження полягає в розробці методологічної схеми комплексного моніторингу та оцінювання екологічного стану урбанізованого простору, а також у обґрунтуванні рекомендацій щодо впровадження природоохоронних заходів, спрямованих на забезпечення сталого екологічного розвитку повоєнних міських агломерацій України.

Активний розвиток міст супроводжується як позитивними, так і негативними екологічними наслідками. Зростання міського населення, інтенсивне будівництво житлових та промислових об'єктів, збільшення обсягів руху автотранспорту, а також недосконалість системи управління відходами створюють серйозні ризики для підтримки екологічного балансу в межах урбанізованих територій.

Антропогенний вплив є однією з найскладніших форм екологічного тиску на міське середовище, що тягне за собою низку трансформацій у природних системах. Втручання людини в природні процеси призводить до порушень функціонування екосистеми в цілому або її окремих компонентів, зокрема: інтенсифікація транспортного руху та зростання кількості промислових об'єктів у межах міста спричиняють збільшення обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Поверхневі водні об'єкти, розташовані в межах урбанізованої території, зазнають значного антропогенного навантаження через скидання недостатньо очищених або повністю

неочищених стічних вод. Додатковим джерелом забруднення є стоки з комунальних підприємств та сільськогосподарських угідь, прилеглих до міста. Найпоширенішими забруднювачами водного середовища є пил, діоксид сірки, фенол, формальдегід, діоксид азоту, чадний газ тощо [1]. Очищені промислові стічні води часто потрапляють у міську каналізаційну систему, що збільшує навантаження на інфраструктуру водовідведення.

Інтенсивна робота промислових підприємств та активний транспортний рух сприяють накопиченню важких металів у міських ґрунтах, що негативно впливає на рослинність та створює потенційну загрозу для здоров'я населення. Стан ґрунтового покриву в межах урбанізованої території є проблематичним через низку характерних особливостей. Великі території сучасних міст представлені так званими «екранованими ґрунтами», поверхневий шар яких покритий штучними матеріалами – асфальтом або бетоном. Такі ґрунти мають підвищену концентрацію забруднювачів, включаючи важкі метали, солі, нафтопродукти, цементний пил, органічні залишки та мінеральний пил. Крім того, забезпечення рослинності необхідними поживними речовинами в міському середовищі значно ускладнюється дефіцитом доступних мінеральних речовин.

Процеси розширення міст та активної забудови спричиняють трансформацію природних ландшафтів та деградацію ґрунтового покриву. Суцільні асфальтові поверхні та щільна забудова сприяють зменшенню площ природних зелених насаджень, що негативно впливає на фізико-хімічний стан ґрунту. Збільшення частки деградованих та непродуктивних земель вимагає впровадження заходів щодо їх збереження та екологічного відновлення [1; 7].

Важливим аспектом є те, що в межах урбанізованих територій під впливом як природних, так і антропогенних факторів виникають різні умови для існування рослинних угруповань. Людський фактор залишається визначальним у цьому процесі. Зокрема, розширення міської інфраструктури часто відбувається за рахунок зменшення площі паркових зон, скверів та територій з природною рослинністю. Це призводить до втрати біорізноманіття, включаючи цено- та генофонд, порушення функціонування екосистем, погіршення якості повітря, зниження рівня екологічного комфорту та зменшення рекреаційного потенціалу для населення [1; 7].

Процеси урбанізації мають значний вплив на мікрокліматичні умови міста, зокрема, вони сприяють формуванню явища, типового для сучасних урбанізованих територій – так званих «міських теплових островів» (МТО), суть якого полягає в значному підвищенні температури повітря в межах міста порівняно з навколишніми сільськими районами, що є наслідком антропогенної діяльності.

На думку багатьох дослідників, основними факторами формування МТО є теплові викиди, спри-

чинені споживанням енергії міським населенням, а також трансформація природного ландшафту. Зокрема, темні міські поверхні, такі як асфальтові або цегляні дахи, мають високу здатність акумулювати сонячну енергію, на відміну від природних поверхонь. Такі зміни призводять до локальних кліматичних зрушень, зокрема нерівномірного розподілу опадів, що, у свою чергу, збільшує ризики таких екстремальних явищ, як повені або посуха.

У більшості міст залишається неврегульованим важливий екологічний аспект – ефективне сортування твердих побутових відходів та їх раціональна утилізація. Погіршення екологічних проблем в урбанізованому середовищі опосередковано впливає на погіршення стану здоров'я населення, що спричи-

нено впливом несприятливих факторів навколишнього середовища [7].

Ще одним актуальним питанням є особливості сучасної харчової поведінки людини. Основною загрозою є низька різноманітність раціону. Типовий раціон міських жителів здебільшого обмежується стандартним набором продуктів – хлібом, борошненими виробами, м'ясом, тваринними або рослинними жирами, тоді як споживання овочів та фруктів є нерегулярним та недостатнім.

Нині залишається незаперечним той факт, що значна частина населення в умовах сучасного способу життя постійно стикається з дефіцитом життєво важливих речовин – вітамінів, мікроелементів, мінеральних сполук та біологічно активних компонентів,

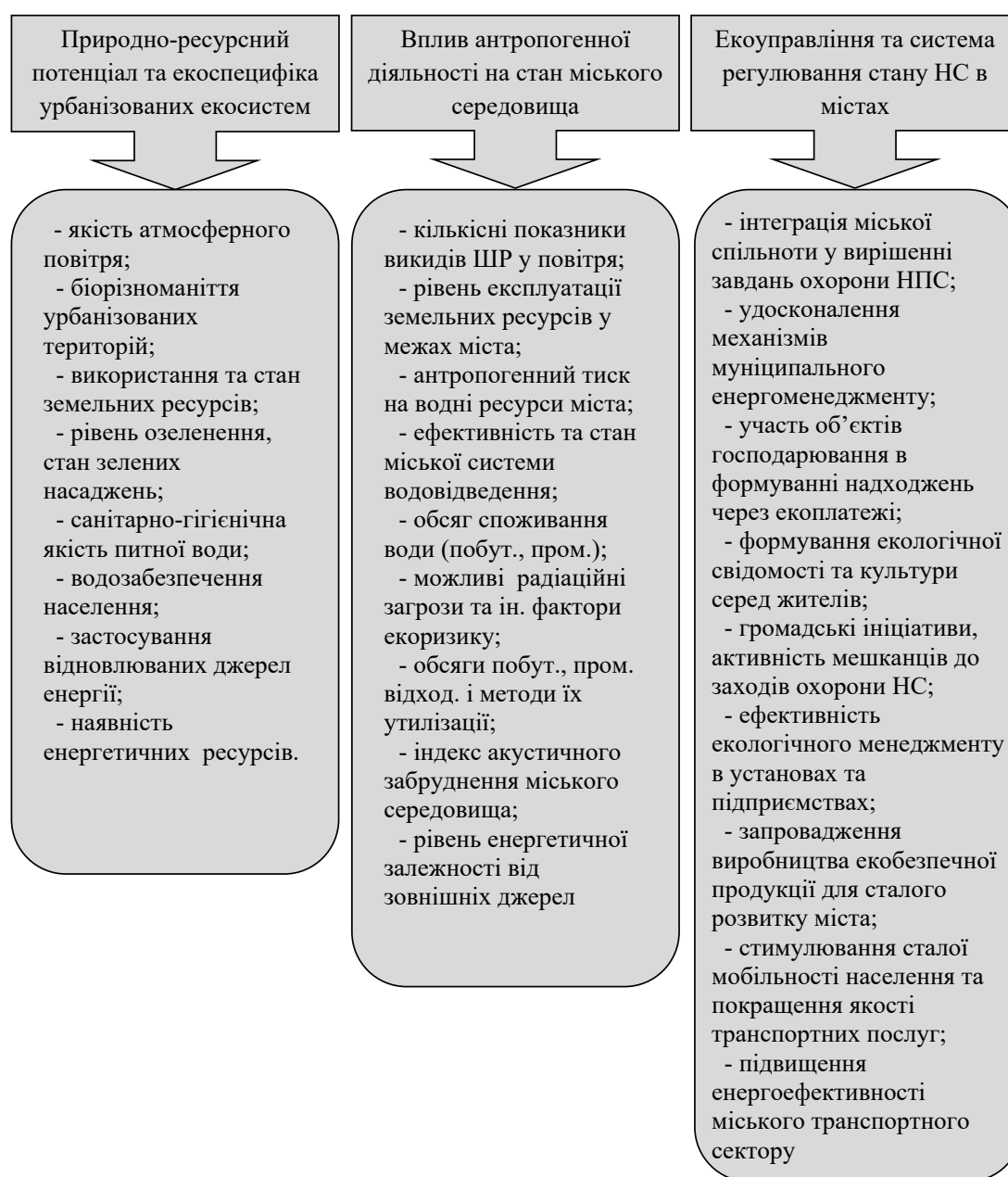


Рис. 1. Методологічна схема комплексної оцінки екологічного стану урбанізованого простору [5; 6]

що забезпечують нормальне функціонування організму [2]. Вітчизняна харчова промисловість майже не орієнтується на міжнародний досвід, працює з високими витратами та без достатньої державної підтримки, що робить її економічно неефективною.

Порушення санітарно-захисних зон окремих об'єктів, зокрема автозаправних станцій у житлових районах, тягне за собою додаткові екологічні ризики та може негативно вплинути на здоров'я

мешканців. Обмежене фінансування екологічних програм ускладнює вирішення існуючих проблем та уповільнює реалізацію нових екологічних ініціатив. Водночас місцеві органи влади мають недостатні повноваження та ресурси, що знижує їхню ефективність у реагуванні на екологічні виклики та у впровадженні необхідних заходів.

В умовах урбанізації, яка визначає розвиток сучасного міста, важливо враховувати взаємодію



Рис. 2. Обґрунтовані рекомендації щодо впровадження природоохоронних заходів для забезпечення сталого розвитку міст України

урбанізованих територій з навколишнім середовищем. Для досягнення цілей сталого розвитку необхідно впроваджувати інфраструктурні рішення, спрямовані на гармонійне поєднання техногенних та природних компонентів, шляхом створення урбанізованих ландшафтів та біоценозів. Хоча урбанізація створює умови для формування соціальної та матеріальної основи здорового покоління, занадто інтенсивні темпи її розвитку, що перевищують екологічний потенціал територій, а також дисбаланс у формуванні міського середовища, призводять до погіршення здоров'я населення [10].

Сучасне українське місто у повоєнний період має функціонувати як штучна, екологічно збалансована система, здатна забезпечити життєдіяльність населення на високому рівні. Планування та подальший розвиток міста повинні полягати в раціональному управлінні його розширенням з урахуванням природних та економічних факторів.

Слід враховувати, що міські простори не завжди забезпечують належний рівень комфорту для про-

живання населення. Саме тому головною метою таких досліджень є перетворення територій різного функціонального призначення на зони сприятливі для життя.

Для комплексного аналізу міського середовища як цілісної екосистеми ми ініціювали розробку та обґрунтування доцільності визначення комплексу показників, що найповніше характеризують його екологічний стан (Див. рис. 1).

З метою забезпечення сталого розвитку міст у повоєнній Україні необхідно впровадити комплекс природоохоронних заходів, розроблених нами як відповідь на сучасні виклики урбанізованого середовища (Див. рис. 2).

Отже, у зв'язку з інтенсивним зростанням міст та поглибленням екологічних проблем у них, виникає нагальна потреба в розробці комплексних підходів до їх вирішення. Дослідження екологічного стану міського середовища повинні проводитися на основі системного підходу, що дозволяє проводити комплексний аналіз екологічних загроз та розробляти ефективні управлінські рішення.

Література

1. Довкілля України. Статистичний збірник. 2022. URL : <https://surl.li/ukubgy>
2. Екологічні аспекти транспортної системи міста : монографія / О. І. Лежнева, Г. М. Желновач, С. В. Очеретенко, Н. В. Пономарьова, Н. В. Прокопенко, Є. В. Любий. Харків, 2017. 180 с.
3. аспекти виробництва та екологічна сертифікація продуктів харчування. С. В. Берзіна: Бібліотека Всеукраїнської екологічної ліги. 2011. № 9: Серія «Стан навколишнього середовища». С. 6-10
4. П.Ю. Машіка, Н.І. Петрецька, В.В. Ковач Екологічний імператив у функціонуванні містобудівних рад: Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право. Том 3 № 86. Ужгород, 2024. Ст. 163-168.
5. Постанова від 24.12.1999 № 1359-XIV (Чинний) Про Концепцію сталого розвитку населених пунктів URL : <https://surl.li/aatouo>
6. Правила утримання жилих будинків та прибудинкових територій. URL: <https://surl.li/nswcbo>
7. Регіональні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні URL : <https://surl.li/cc/snkpha>
8. Л. В. Сергієнко Екологічні наслідки урбанізації в системі загроз безпеці урбанізованим територіям URL: <https://surl.li/kgfbyh>
9. В.С. Цигода Екологізація та урбанізація міського середовища. Науковий вісник НЛТУ України, 2013. Вип. 235. Ст. 347- 353.
10. Шилова Т.О. Міське комунальне господарство : Навчальний посібник. Київ : КНУБА, 2006. 272 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 20.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

EUROPEAN UNION ACADEMIC PROJECT MANAGEMENT IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT FOR UKRAINIAN STUDENTS¹

Yakymenko I.¹, Madzhd S.¹, Salavor O.¹, Nychyk O.¹, Shapovalov Ye.¹, Hrehirchak N.¹, Giritch A.²

¹National University of Food Technologies

Volodymyrska St, 68, 01033, Kyiv

²Nomad Bioscience GmbH,

Bargstrasse, 1, 06108, Halle, Germany

iyakymen@gmail.com; madzhd@ukr.net; saloksamir@ukr.net; nychik@ukr.net;
gws0731512025@gmail.com; g_natal@ukr.net; gyrych@nomadbioscience.com

The European Union (EU) provides great opportunities for academic institutions to participate in the world leading academic programmes, such as Erasmus+ and Horizon Europe. These programmes policies, terms and conditions give a perfect understanding of effective European Union project management approaches. The European Commission also developed PM² Methodology for effective management of EU funding projects. The Jean Monnet Module implemented at the National University of Food Technologies (NUFT), Kyiv under the support of Erasmus+ programme in 2022-2025, aims to educate Ukrainian students on effective EU management of academic projects in European sustainability. The main activity of the Module is the teaching course for PhD students at NUFT. The course covers key aspects of effective project management relevant to EU academic programmes, including general issues of effective project management, the EU academic programmes analysis, project proposal preparation, project team work, risk management, quality assurance and other relevant issues. Additional teaching activities of the Module include annual Jean Monnet winter and summer schools on EU academic project management for young university teachers and researchers. The main expected results of the Module are increased awareness of the learners on EU effective approaches in academic project management and developing relevant practical skills. The outputs of the Module will include sharing knowledge on world leading EU educational and research programmes, motivation of learners to participate actively in the EU funding projects. Positive feedback from the learners allows us to recommend this and similar teaching courses for other universities of Ukraine. *Key words:* academic project management, European academic culture, Erasmus+ programme, PhD programme, Ukrainian universities

Менеджмент академічних проєктів Європейського Союзу зі сталого розвитку для українських студентів. Якименко І.І., Маджд С.М., Салавор О.М., Ничик О.В., Шаповалов Є.Б., Грегирчак Н.М., Гиріч А.М.

Європейський Союз (ЄС) надає академічним установам чудові можливості для участі у провідних світових академічних програмах, таких як Erasmus+ та Horizon Europe. Політика, умови та положення цих програм дають чудове розуміння ефективних підходів Європейського Союзу до управління проєктами. Європейська Комісія також розробила методологію PM² для ефективного управління проєктами, що фінансуються ЄС. Модуль Жана Моне, що впроваджується в Національному університеті харчових технологій (НУХТ), Київ, за підтримки програми Erasmus+ у 2022-2025 роках, має на меті навчити українських студентів ефективному управлінню академічними проєктами Європейського Союзу в галузі європейської стійкості. Основним видом діяльності Модуля є навчальний курс для докторантів НУХТ. Курс охоплює ключові аспекти ефективного управління проєктами, що стосуються академічних програм ЄС, включаючи загальні питання ефективного управління проєктами, аналіз академічних програм ЄС, підготовку проєктних пропозицій, роботу в проєктній команді, управління ризиками, забезпечення якості та інші питання. Додаткова освітня активність Модуля включає щорічні зимові та літні школи Жана Моне з управління академічними проєктами ЄС для молодих викладачів та дослідників університетів. Основними очікуваними результатами Модуля є підвищення обізнаності слухачів про ефективні підходи ЄС до управління академічними проєктами та розвиток відповідних практичних навичок. Результати Модуля включатимуть обмін знаннями про провідні освітні та дослідницькі програми ЄС, мотивацію учнів до активної участі в проєктах фінансування ЄС. Позитивні відгуки слухачів дозволяють нам рекомендувати цей та аналогічні навчальні курси для інших університетів України. *Ключові слова:* управління академічними проєктами, європейська академічна культура, програма Erasmus+, PhD програма, українські університети

Problem statement. The European Union (EU) has a long-term successful experience in multinational and international academic programmes. Globally recognized EU academic programmes Erasmus+, including KA1, KA2 and Jean Monnet activities [1], and Horizon Europe [2] demonstrate EU world leading policies and practices in international academic collaboration. These

and other European programmes provide not only great opportunities for scientists and students to participate in its projects, but share valuable approaches on effective academic project management [3]. Studying policies, terms and conditions of EU academic programmes is especially valuable for young researchers and university teachers, who may apply this knowledge for participation in EU programmes and for effective management of other academic projects.

The Jean Monnet Module Project of Erasmus+ programme (2022-2025) at the National University of Food Technologies (NUFT) aims to promote EU policies and

¹ Supported by Erasmus+ projects 101085243-ProEU-ERASMUS-JMO-2022-HEI-TCHRSCH, 101127449-EcoEurope-ERASMUS-JMO-2023-HEI-TCH-RSCH, and 101085755-JM-RE-ERASMUS-JMO-2022-HEI-TCH-RSCH. The authors are grateful to the Armed Forces of Ukraine for the protection.

best practices in academic project management among Ukrainian PhD students, young university teachers and researchers, representatives of civil society and civil servants. In terms of the teaching course, PhD students of different specialties will get unique knowledge and insights on leading role of the EU in education and research through effective policies and management of EU funding academic programmes and projects. Annual Jean Monnet schools with involvement of civil society representatives and civil servants will spread knowledge on effective EU project management beyond academy and bring the EU closer to the public.

Needs analysis and specific objectives of the Module. Open and fair competition in terms of calls of educational and research programmes is a key feature of European academic culture. And studies on effective management of academic projects are an important part of many European universities curricular. This knowledge is urgently needed for Ukrainian young researchers and university teachers. Being artificially separated from European academic culture by decades of soviet history/occupation, Ukrainian researchers and professors are only starting to follow best European traditions of academic project management. And relevant education of Ukrainian PhD students and young researchers/teachers on effective EU policies and best practices of academic project management will put them closer to European Union academic culture and make them much more effective professionals in their fields. These skills and knowledge are also relevant for civil society representatives and civil servants due to their possible involvement into EU funding programmes and projects.

The Module covers all key aspects of EU academic project management. It includes university teaching course on 40 academic hours for PhD students at NUFT each year. Learners are motivated to carry out research and actively participate in teaching course delivery in terms of student-centered learning: some topics/case studies are delivered by students. And a few reports at International conferences are delivered by the learners on the European academic culture and project management each year (see, for example [4, 5]). Annual Jean Monnet winter and summer schools in terms of the project were planned to involve at least 50 young university teachers and researchers, but actually involved over 300 – 500 learners annually.

Complementarity of the Module with other actions. During the last decade, NUFT actively develops Eurointegration strategy as a roadmap for research and education. A few Jean Monnet projects on EU sustainability have been successfully implemented for Master students of different departments at the university under academic coordination of Prof. Igor Yakymenko [6]. It became clear that further involvement of the university staff and students into European Union projects needs more knowledge on EU academic culture, policies and project management. That is why during last five years teaching team of Prof. Igor Yakymenko provided train-

ings for university staff on different aspects of European Union academic projects in terms of a few summer schools. Moreover, a university teaching course on scientific project management was implemented for PhD students of different departments at NUFT. This teaching course had been already significantly related to EU academic culture and project management, and transforming it into the Module on European Union policies and best practices of academic project management was the logical step to deepen EU content of the course.

Importantly, potential learners of the Module are actively involved into research and teaching at different departments of the university. Their knowledge and skills on EU academic project management will have very direct positive impact on their career and their academic environment. In the nearest future, they may become active participants of EU academic programme calls and effective managers of EU funding academic projects. Even wider impact of the Module on the society will be provided through the annual Jean Monnet schools with involvement of Ukrainian civil society representatives and civil servants. The Module implies active involvement of EU colleagues into delivering invited lectures both for PhD students and for learners of Jean Monnet schools. We have close collaboration with our colleagues at Lund University, Sweden and Masaryk University, Czech Republic. And the Module team member Dr. Anatoli Giritch, Nomad Bioscience GmbH, Germany shares his first-hand experience and skills in European academic culture and project management. The direct contact of learners with EU partners is developing further collaboration between Ukrainian and European Union scientists and their institutions.

Concept and methodology of the Module. The Module comprises topical issues on EU academic culture and project management and implies different forms of teaching and research activities. Wide research background and teaching experience of the academic coordinator Prof. Igor Yakymenko and the teaching team members guarantees relevant teaching and research programmes of the Module through the teamwork on the syllabus of the university teaching course, agenda of Jean Monnet schools, and programmes of research activities, including PhD student projects. The teaching programmes are significantly based on official EU documents, e.g., academic programme guides, [7], and analytical reports [8-10], thus providing students/learners with official position of EU regulatory bodies.

The university teaching course covers all key aspects of effective management of EU funding academic projects. The course has been continuously developed during the project lifetime based on feedbacks from the students and due to critical analysis of the teaching team. The teaching methods vary from interactive lectures/presentations to practical seminars, including case studies and research project presentations. Practical seminars stimulate students to analyze official EU documents and analytical reports. Seminars involve students

into analysis of relevant scientific publications as well as peer review of each other reports and presentations. Case studies are used for studying the best practices in academic project management in the EU, and for assessment of students' own ideas and project proposals. The seminars are moderated by teaching team members and students. Thus, student-centered learning has been practicing in terms of the Module with active involving of students into the moderation of discussions, round tables and peer review practices.

Syllabus of the university course on EU academic project management includes such topics: General characteristics of academic project activities. Project life cycle. European academic and project culture; Programmes and grants of the European Union as a source of funding for academic projects. European standards and mechanisms for competitive selection of projects; European Union Erasmus + programme policies and best practices in support of educational projects; European Union policies and best practices to support research projects under the Horizon of Europe programme; Individual research and educational projects of students and young researchers in the framework of EU programmes Erasmus + and Horizons of Europe; Effective communication and teamwork in all stages of implementation of academic projects; Quality assurance of academic projects; Risk management in implementation of academic projects; Reporting on the implementation of European research and educational projects. Dissemination of project results and outcomes.

Involving PhD students into research in terms of the Module, including PhD project implementation, provides multidisciplinary synergy of knowledge obtained them during the teaching course of the Module and their professional knowledge and background.

The Jean Monnet school agenda is oriented to involve additional group of young teachers and researchers from other Ukrainian universities, but also representatives of civil society and civil servants. This typically includes topical lectures/presentations of the teaching team members and invited speakers from the EU, as well as discussions with active involving all participants of the events.

The further visibility of the Jean Monnet Module to professionals and representatives of civil society is achieved through the online activities, including posting of videos, presentations, EU documents, reports and relevant scientific publications on the website of the project and on social media (see, for example, <https://edsd.nuft.edu.ua>)

Quality assurance, monitoring and evaluation strategy. The Module has been implemented by experienced teaching team with relevant academic background. Academic coordinator Prof. Yakymenko has a few successfully implemented Jean Monnet projects, which provided him with relevant knowledge and skills for coordination of this Module. Detailed working plan and clear understanding the role of each team member ensured effective implementation of the Module. During

all stages of the project all team members are involved in critical self-assessment of effectiveness of the project implementation.

The Module teaching and research activities has been officially included into the curricula and the plan of activities of the Department of Ecology and Ecomanagement, NUFT. This automatically puts the project under the control of the university relevant officials, e.g., quality of the syllabus and the teaching course are under the control of the office of Vice-rector on Educational Work and Center for Quality Monitoring and Coordination of Educational Activities of the university; the research activities are under the control of Vice-rector on R&D office. General control on the Module implementation has been carried out by International Department of the university, and semi-annual reports are applied to the International Department of Ministry of Education and Science of Ukraine.

At the end of each teaching course of the Module, anonymous survey of students on the quality, topicality and relevance of the teaching materials and methods is carried out and critically assessed by the teaching team of the project. Positive feedbacks from the graduates from the Module are typically over 95% of learners.

The important teaching activity for non-academic learners in terms of the Module is Jean Monnet summer schools for NGO representatives and civil servants. The Jean Monnet schools provide the representatives of national civil society and civil servants by topical information on EU approaches and strategies in academic programmes and project management.

Outcomes of research activities in term of the Module imply peer reviewed publications of the project team, and reports of the results at scientific conferences. Peer review process and public presentations of the research results give independent assessment of quality of project research outcomes.

Impact and ambition of the Module. There are three main target groups of the project: PhD students and young university teachers and researchers; civil society representatives; and civil servants.

For the first target group, in short-term perspective, the Module allows them to better manage their own PhD projects and other relevant project activities. In medium-term perspective new knowledge and skills will stimulate them actively participate in EU funding academic programme calls. In long-term perspective, the Module may result in formation of new generation of researchers and university professors with strong adherence to European academic culture.

The second target group, representatives of civil society, will benefit from the Module through the understanding of great opportunities of effective project management and EU funding programmes. In short-term perspective new knowledge helps them to manage their social projects and activities more effectively. In medium- and long-term perspective, the Module will stimulate them to use great opportunities of EU pro-

grammes for NGOs and the general public, collaborating with EU partners.

The third target group of the Module, civil servants benefits from the Module due to better understanding of effective project management and applying these new knowledge and skills to their professional activities. It will promote better management of national academic programmes, participation in EU programmes, and activate structural reforms in the fields of science and education in Ukraine.

Sustainability, long-term impact and continuation of the Module. During three year period of the Jean Monnet Module under the support of Erasmus+ programme, university teaching course for PhD students on European Union academic project management has been developed, delivered and implemented into PhD programmes at NUFT. This course is mandatory now for all PhD students of the first year at NUFT. Thus the teaching course will continue after the formal end of the project.

The annual Jean Monnet schools on European Union academic project management for the wide audience has been implemented during lifetime of the Module, but the key elements of the school agenda will be used further after the end of the Module during promotional and educational events of the Department of Ecology and Ecomanagement at NUFT.

The Module has good synergy with our previous Jean Monnet project – Jean Monnet Centre of Excellence on EU Circular and Green Economy at NUFT (academic coordinator Prof. Igor Yakymenko). For example, international conferences and academia-business forum of that project is a perfect platform for dissemination of

results of the Module, including delivering reports of the Module team and PhD students involved [4, 5, 11, 12].

The learners of the Module, PhD students and young researchers/university teachers will provide sustainability of the Module, implementing their new knowledge and skills into their professional activities.

Conclusions. Studying European Union programmes such as Erasmus+ and Horizon Europe terms and conditions gives a perfect understanding of effective EU academic project management approaches. The European Commission's PM2 Methodology for effective management of EU funding projects is another valuable source of practical recommendations on European academic project management. The Jean Monnet Module implemented at the National University of Food Technologies, Kyiv in 2022-2025 under the support of Erasmus+ programme, aims to educate Ukrainian students on effective EU academic project management. The main activity of the Module is the teaching course for PhD students at NUFT. The course covers key aspects of effective project management relevant to EU academic programmes and European sustainability. Additional teaching activities of the Module include annual Jean Monnet winter and summer schools on EU academic project management for young university teachers and researchers, and civil society and civil servants. The main results of the Module are increased awareness on EU effective approaches in academic project management and developing relevant practical skills of learners. Our positive experience in terms of this Module allows us to recommend implementation of this and similar university teaching courses to other Ukrainian universities.

References

1. Sidiropoulos, D., Guidelines for preparing a successful Erasmus+ proposal. *E-mentor*, 2024. 106(4): p. 41-51.
2. Tenhunen-Lunkka, A. and R. Honkanen, Project coordination success factors in European Union-funded research, development and innovation projects under the Horizon 2020 and Horizon Europe programmes. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 2024. 13(1): p. 7.
3. Orieno, O.H., et al., Sustainability in project management: A comprehensive review. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2024. 21(1): p. 656-677.
4. Selected Papers of the VI International Conference on European Dimensions of Sustainable Development, May 15 – 17, 2024. – Kyiv: NUFT, 2024. – 484 p., 2024.
5. Selected Papers of the V International Conference on European Dimensions of Sustainable Development, June 1-2, 2023. – Kyiv: NUFT, 2023. – 403 p, 2023.
6. Yakymenko, I., et al., European Sustainability: Ambitions and Challenges. *Selected Papers of the VI International Conference on European Dimensions of Sustainable Development, May 15-17, 2024*, 2024: p. 11-18.
7. Martínez Montes, G., et al., Project management methodologies: Challenges and trends. The PM2 case. *Project Management*, 2021. 1: p. 014.
8. Eurostat, Sustainable development in the European Union. Overview of progress towards the SDGs in an EU context, 2020.
9. EuroStat, Renewable energy statistics, 2024.
10. Ribeiro-Lopes, S., et al., Application of the PM² methodology in the project management of the Portuguese Project Management Observatory creation–Initiating phase. *Procedia Computer Science*, 2022. 196: p. 816-823.
11. Proceedings of the V International Conference on European Dimensions of Sustainable Development, June 1 – 2, 2023. – Kyiv: NUFT, 2023. – 123 p. 2023.
12. Proceedings of the VI International Conference on European Dimensions of Sustainable Development, May 15 – 17, 2024. – Kyiv: NUFT, 2024. – 137 p. 2024.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ТА ЛАНДШАФТНОГО РІЗНОМАНІТТЯ

УДК 504.06

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИРОДООХОРОННОГО ІНСПЕКТУВАННЯ У КОНТЕКСТІ СТІЙКОСТІ ЛАНДШАФТІВ ДО ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Гончарук В. В., Парахненко В. Г.

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

вул. Садова 2, 20300, Умань

gvitalii1975@gmail.com, vladparachnenko@ukr.net

Здійснено комплексну оцінку ефективності природоохоронного інспектування як ключового інструменту державного екологічного контролю в умовах зростаючого техногенного навантаження на природні ландшафти. Актуальність дослідження зумовлена потребою в удосконаленні системи екологічного нагляду з урахуванням глобальних екологічних викликів, зокрема кліматичних змін, урбанізації, індустріалізації, деградації ландшафтів і зниження здатності екосистем до самовідновлення. Звертається увага на невідповідність чинної нормативно-правової бази сучасним потребам охорони довкілля. Проведено критичний аналіз діючих законодавчих і підзаконних актів, що регламентують діяльність природоохоронних інспекцій, та здійснено їх зіставлення з реальними екологічними загрозами, пов'язаними з погіршенням стану природного середовища.

У роботі розглянуто сучасні підходи до оцінки стійкості ландшафтів як основи для екологічного планування та прийняття рішень у сфері природоохоронного інспектування. Особливу увагу приділено просторово-функціональній оцінці здатності ландшафтів до адаптації та саморегуляції під впливом антропогенних факторів. Розкрито механізми впливу якості інспекційної діяльності на екологічну стабільність територій, зокрема через своєчасне виявлення порушень природоохоронного законодавства, попередження нелегальної господарської діяльності, а також реалізацію профілактичних та відновлювальних заходів.

Окремий акцент зроблено на міжвідомчій взаємодії органів екологічного контролю з іншими секторальними структурами, зокрема у сферах землекористування, лісового та водного господарства, надрокористування. Розглянуто можливості використання геоінформаційних систем (ГІС), технологій дистанційного зондування Землі та автоматизованого моніторингу для підвищення ефективності, прозорості та оперативності екологічного нагляду. Представлено приклади інтеграції просторових даних у процес прийняття управлінських рішень, що дозволяє своєчасно реагувати на загрози та формувати адаптивну природоохоронну політику.

Результати дослідження мають практичне значення для працівників органів державного екологічного контролю, спеціалістів природоохоронних установ, науковців, екологів, ландшафтознавців і управлінців природними ресурсами. Вони можуть стати підґрунтям для розробки стратегічних документів та рекомендацій з удосконалення механізмів природоохоронної діяльності в умовах посилення техногенного тиску на довкілля. *Ключові слова:* природоохоронне інспектування, ландшафтна екологія, стійкість ландшафтів, техногенне навантаження, екологічний контроль, деградація ландшафтів, геоінформаційні системи, екосистемні функції, екологічна політика, моніторинг довкілля.

Assessment of the effectiveness of environmental inspection in the context of landscape resilience to technological loads Parakhnenko V., Goncharuk V.

A comprehensive assessment of the effectiveness of environmental inspection as a key instrument of state environmental control in conditions of growing anthropogenic pressure on natural landscapes has been carried out. The relevance of the study is determined by the need to improve the environmental monitoring system, taking into account global environmental challenges, in particular climate change, urbanisation, industrialisation, landscape degradation and the decline in the ability of ecosystems to self-regenerate. Attention is drawn to the inconsistency of the current regulatory framework with modern environmental protection needs. A critical analysis of existing legislative and regulatory acts governing the activities of environmental inspections has been carried out, and they have been compared with the real environmental threats associated with the deterioration of the natural environment.

The paper considers modern approaches to assessing landscape sustainability as a basis for environmental planning and decision-making in the field of environmental inspection. Particular attention is paid to the spatial and functional assessment of the ability of landscapes to adapt and self-regulate under the influence of anthropogenic factors. The mechanisms of the impact of the quality of inspection activities on the ecological stability of territories are revealed, in particular through the timely detection of violations of environmental legislation, the prevention of illegal economic activities, and the implementation of preventive and restorative measures.

Particular emphasis is placed on interdepartmental interaction between environmental control bodies and other sectoral structures, in particular in the areas of land use, forestry and water management, and subsoil use. The possibilities of using geographic information systems (GIS), remote sensing technologies and automated monitoring to improve the efficiency, transparency and responsiveness of environmental supervision are considered. Examples of the integration of spatial data into the management decision-making process are presented, which allows for timely response to threats and the formation of adaptive environmental protection policies.

The results of the study are of practical importance for employees of state environmental control bodies, specialists of environmental protection institutions, scientists, ecologists, landscape scientists and natural resource managers. They can serve as a basis for the development of strategic documents and recommendations for improving environmental protection mechanisms in the context of increasing anthropogenic pressure on the environment. *Key words:* environmental inspection, landscape ecology, landscape sustainability, technogenic load, environmental control, landscape degradation, geoinformation systems, ecosystem functions, environmental policy, environmental monitoring.

Постановка проблеми. В умовах зростаючого техногенного навантаження на довкілля проблема забезпечення екологічної безпеки та збереження природних ландшафтів набуває особливої актуальності. Урбанізація, індустріалізація, інтенсивне сільське господарство та експлуатація природних ресурсів спричиняють деградацію екосистем, зниження біорізноманіття та зменшення природної стійкості ландшафтів. У цьому контексті ключову роль відіграє система державного природоохоронного інспектування, ефективність якої безпосередньо впливає на можливість своєчасного виявлення порушень, реагування на екологічні загрози та запобігання подальшій трансформації природних комплексів.

Однак на практиці спостерігається низка проблем, що ускладнюють досягнення цілей сталого природокористування. Серед них – недостатній рівень координації між органами екологічного контролю, обмеженість фінансових та людських ресурсів, фрагментарність екологічного моніторингу та відсутність системного підходу до оцінки стійкості ландшафтів. Водночас сучасні виклики потребують інтеграції ландшафтно-екологічного підходу до практики екологічного інспектування, що дозволить більш комплексно враховувати просторово-часові характеристики впливу техногенних факторів на природне середовище [1].

Актуальність проблеми посилюється необхідністю розробки ефективних критеріїв та методик оцінки результативності природоохоронного інспектування з урахуванням здатності ландшафтів до самовідновлення, адаптації та довготривалого функціонування в умовах антропогенного пресингу. Таким чином, існує нагальна потреба у формуванні науково обґрунтованої методології оцінки ефективності контролюючої діяльності, спрямованої на підвищення екологічної стійкості ландшафтних систем.

Актуальність дослідження. Зростаюча інтенсивність техногенного впливу на природне середовище зумовлює необхідність перегляду підходів до екологічного управління, зокрема в частині контролю за дотриманням природоохоронного законодавства. Ландшафти, як складні природно-антропогенні системи, реагують на техногенне навантаження різною мірою, в залежності від їхньої структури, ресурсоемності, ступеня порушення та здатності до саморегуляції. У зв'язку з цим постає необхідність врахування параметрів ландшафтно-екологічної стійкості у процесі екологічного інспектування, що до сьогодні залишається поза межами стандартних контрольних процедур.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Авторський доробок спрямований на вирішення комплексу актуальних наукових і практичних завдань у сфері екологічного моніторингу, природоохоронної політики та ландшафтно-екології. У контексті сучасних викликів, пов'язаних із наростанням техногенного тиску на природне середовище, результати дослідження сприяють удосконаленню теоретико-методологічної бази оцінки ефективності природоохоронного інспектування. Запропоновані у дослідженні підходи базуються на інтеграції ландшафтно-екологічного аналізу з системою контролюючих заходів, що дозволяє забезпечити просторову адресність інспекційної діяльності, підвищити її результативність та адаптивність до специфіки природних умов [2].

Практична цінність дослідження полягає у формуванні науково обґрунтованих критеріїв і показників ефективності екологічного контролю, які враховують рівень стійкості ландшафтів до техногенних впливів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні десятиліття позначені активізацією наукових досліджень, присвячених питанням екологічного контролю, охорони довкілля та збереження стійкості природних ландшафтів в умовах антропогенного пресингу. Серед фундаментальних праць варто відзначити роботи, що висвітлюють методологічні основи оцінки екологічного ризику, функціонування систем моніторингу довкілля (З.В. Герасимчук, І.Ю. Молчанова, В.І. Бондаренко), а також теоретичні аспекти ландшафтно-екології та класифікації ландшафтно-екологічної стійкості (О.М. Маринич, З.М. Тимченко, В.С. Преображенський) [3].

Поряд з цим, у науковому дискурсі все частіше порушується проблема неефективності традиційних механізмів природоохоронного інспектування, які орієнтовані переважно на виявлення формальних порушень без належного урахування екосистемного підходу (С.І. Грінченко, О.А. Літвінова). У низці публікацій обґрунтовується потреба в інтеграції природоохоронного нагляду з ландшафтно-екологічним аналізом, що дозволяє краще прогнозувати екологічні наслідки діяльності людини та сприяти запровадженню адаптивного екологічного управління [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Незважаючи на значну кількість наукових досліджень, присвячених питанням екологічного моніторингу, ландшафтно-екологічної стійкості та діяльності природоохоронних органів, у науковому

дискусії досі залишаються окремі аспекти, які потребують подальшого осмислення та уточнення. Невирішеним залишається питання розробки універсальних, але гнучких критеріїв оцінки ефективності інспекцій, здатних відображати як адміністративно-правові, так і природно-географічні особливості територій [5].

Новизна: дослідження полягає у комплексному підході до оцінювання ефективності природоохоронного інспектування з урахуванням стійкості ландшафтів до техногенного навантаження. На відміну від традиційних підходів, що фокусуються переважно на адміністративно-контрольних аспектах, у даній роботі пропонується оцінювати інспекційну діяльність через призму екологічної результативності та впливу на ландшафтну стійкість.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у розробці інтегративного підходу до оцінювання природоохоронної діяльності з урахуванням ландшафтно-екологічної стійкості до техногенного навантаження. Запропоновані у роботі методи поєднують елементи екологічного моніторингу, просторового аналізу (ГІС-технологій), а також системної оцінки ефективності інспекційної діяльності на регіональному рівні. Загальнонаукове значення дослідження полягає в уточненні уявлень про роль природоохоронного інспектування як ключового інструмента впливу на стійкість природних систем до антропогенних викликів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження охоплює ключові показники, що характеризують вплив інспекційної діяльності на стан довкілля. Особлива увага приділяється співвідношенню між кількістю проведених перевірок, виявлених порушень та накладених штрафів. Для об'єктивного аналізу було обрано п'ять регіонів, які репрезентують різні типи господарської діяльності та рівень техногенного навантаження. Дані згруповані за п'ятьма рівнями оцінювання та подані у вигляді таблиць і графіків для наочності. У розрахунках використано стандартні індикатори ефективності, що дозволяють порівнювати результати між регіонами. Регіони аналізуються з урахуванням їх географічного розташування, економічного профілю та екологічної ситуації. Оцінка ефективності інспекцій дозволяє виявити сильні та слабкі сторони чинної системи контролю. Отримані

результати мають практичне значення для вдосконалення державної екологічної політики. Подальший аналіз допоможе сформулювати рекомендації для підвищення ефективності природоохоронного моніторингу [6].

Характеристика регіонів:

P1: Дніпропетровська область – промислово розвинений, високе техногенне навантаження.

P2: Полтавська область – аграрний, середнє навантаження.

P3: Київська область – змішаний тип господарства.

P4: Івано-Франківська область – природоохоронні зони з низьким навантаженням.

P5: Черкаська область – території навколо мегаполісів, критичне навантаження.

У таблиці 1 представлено статистику для наступних регіонів:

P1 – проведено 79 інспекцій, виявлено 41 порушень, сума штрафів склала 77 тис. грн. Регіон 1 – промислово розвинений, високе техногенне навантаження.

P2 – проведено 64 інспекцій, виявлено 84 порушень, сума штрафів склала 65 тис. грн. Регіон 2 – аграрний, середнє навантаження.

P3 – проведено 26 інспекцій, виявлено 47 порушень, сума штрафів склала 33 тис. грн. Регіон 3 – змішаний тип господарства.

P4 – проведено 78 інспекцій, виявлено 79 порушень, сума штрафів склала 95 тис. грн. Регіон 4 – природоохоронні зони з низьким навантаженням.

P5 – проведено 20 інспекцій, виявлено 25 порушень, сума штрафів склала 82 тис. грн. Регіон 5 – території навколо мегаполісів, критичне навантаження.

У таблиці 2 представлено статистику для наступних регіонів:

P1 – проведено 68 інспекцій, виявлено 79 порушень, сума штрафів склала 89 тис. грн. Регіон 1 – промислово розвинений, високе техногенне навантаження.

P2 – проведено 12 інспекцій, виявлено 29 порушень, сума штрафів склала 68 тис. грн. Регіон 2 – аграрний, середнє навантаження.

P3 – проведено 45 інспекцій, виявлено 28 порушень, сума штрафів склала 99 тис. грн. Регіон 3 – змішаний тип господарства.

Таблиця 1

Статистика природоохоронного інспектування – Рівень 1

Регіон	К-сть інспекцій	Порушення	Штрафи, тис. грн
Дніпропетровська область	79	41	77
Полтавська область	64	84	65
Київська область	26	47	33
Івано-Франківська область	78	79	95
Черкаська область	20	25	82

Таблиця 2

Статистика природоохоронного інспектування – Рівень 2

Регіон	К-сть інспекцій	Порушення	Штрафи, тис. грн
Дніпропетровська область	68	79	89
Полтавська область	12	29	68
Київська область	45	28	99
Івано-Франківська область	76	28	29
Черкаська область	80	61	42

Таблиця 3

Статистика природоохоронного інспектування – Рівень 3

Регіон	К-сть інспекцій	Порушення	Штрафи, тис. грн
Дніпропетровська область	49	48	91
Полтавська область	10	20	66
Київська область	98	59	32
Івано-Франківська область	40	51	16
Черкаська область	25	99	69

Таблиця 4

Статистика природоохоронного інспектування – Рівень 4

Регіон	К-сть інспекцій	Порушення	Штрафи, тис. грн
Дніпропетровська область	11	10	57
Полтавська область	21	78	46
Київська область	41	18	28
Івано-Франківська область	57	89	12
Черкаська область	29	33	63

Р4 – проведено 76 інспекцій, виявлено 28 порушень, сума штрафів склала 29 тис. грн. Регіон 4 – природоохоронні зони з низьким навантаженням.

Р5 – проведено 80 інспекцій, виявлено 61 порушень, сума штрафів склала 42 тис. грн. Регіон 5 – території навколо мегаполісів, критичне навантаження [7].

У таблиці 3 представлено статистику для наступних регіонів:

Р1 – проведено 49 інспекцій, виявлено 48 порушень, сума штрафів склала 91 тис. грн. Регіон 1 – промислово розвинений, високе техногенне навантаження.

Р2 – проведено 10 інспекцій, виявлено 20 порушень, сума штрафів склала 66 тис. грн. Регіон 2 – аграрний, середнє навантаження.

Р3 – проведено 98 інспекцій, виявлено 59 порушень, сума штрафів склала 32 тис. грн. Регіон 3 – змішаний тип господарства.

Р4 – проведено 40 інспекцій, виявлено 51 порушень, сума штрафів склала 16 тис. грн. Регіон 4 – природоохоронні зони з низьким навантаженням.

Р5 – проведено 25 інспекцій, виявлено 99 порушень, сума штрафів склала 69 тис. грн. Регіон

5 – території навколо мегаполісів, критичне навантаження.

У таблиці 4 представлено статистику для наступних регіонів:

Р1 – проведено 11 інспекцій, виявлено 10 порушень, сума штрафів склала 57 тис. грн. Регіон 1 – промислово розвинений, високе техногенне навантаження.

Р2 – проведено 21 інспекцій, виявлено 78 порушень, сума штрафів склала 46 тис. грн. Регіон 2 – аграрний, середнє навантаження.

Р3 – проведено 41 інспекцій, виявлено 18 порушень, сума штрафів склала 28 тис. грн. Регіон 3 – змішаний тип господарства.

Р4 – проведено 57 інспекцій, виявлено 89 порушень, сума штрафів склала 12 тис. грн. Регіон 4 – природоохоронні зони з низьким навантаженням.

Р5 – проведено 29 інспекцій, виявлено 33 порушень, сума штрафів склала 63 тис. грн. Регіон 5 – території навколо мегаполісів, критичне навантаження.

У таблиці 5 представлено статистику для наступних регіонів:

Р1 – проведено 42 інспекцій, виявлено 33 порушень, сума штрафів склала 84 тис. грн. Регіон 1 –

Статистика природоохоронного інспектування – Рівень 5

Регіон	К-сть інспекцій	Порушення	Штрафи, тис. грн
Дніпропетровська область	42	33	84
Полтавська область	81	45	47
Київська область	93	98	34
Івано-Франківська область	27	91	75
Черкаська область	63	44	89

промислово розвинений, високе техногенне навантаження.

P2 – проведено 81 інспекцій, виявлено 45 порушень, сума штрафів склала 47 тис. грн. Регіон 2 – аграрний, середнє навантаження.

P3 – проведено 93 інспекцій, виявлено 98 порушень, сума штрафів склала 34 тис. грн. Регіон 3 – змішаний тип господарства.

P4 – проведено 27 інспекцій, виявлено 91 порушень, сума штрафів склала 75 тис. грн. Регіон 4 – природоохоронні зони з низьким навантаженням.

P5 – проведено 63 інспекцій, виявлено 44 порушень, сума штрафів склала 89 тис. грн. Регіон 5 – території навколо мегаполісів, критичне навантаження.

На рисунку 1 зображено індекс ефективності інспекцій у регіонах. Вищий індекс вказує на більше співвідношення між кількістю інспекцій та результативністю виявлення порушень. Наприклад, P1 має високий показник завдяки великій кількості перевірок у промислових зонах, тоді як P4 нижчий через природоохоронний статус.

Рисунок 2 демонструє бал техногенного навантаження. Найвищий показник у P5, що відповідає зоні з урбанізованими територіями. Регіон P4 має най-

нижче навантаження завдяки наявності природних заповідників [8].

Головні висновки. У процесі оцінки ефективності природоохоронного інспектування в контексті стійкості ландшафтів до техногенного навантаження встановлено, що інспектування є важливим інструментом екологічної безпеки та регулювання техногенного впливу на довкілля. Його результативність залежить від цілісного підходу, що включає нормативно-правову базу, технічне забезпечення, фаховий рівень персоналу та ефективну взаємодію між установами. Регулярний моніторинг, оперативне реагування на порушення та заохочення підприємств до екологічно відповідального поведіння підвищують стійкість природних ландшафтів. Водночас актуальною залишається потреба у вдосконаленні системи індикаторів ефективності, які б відображали не лише кількісні, а й якісні результати інспекційної діяльності, зокрема покращення стану довкілля. Для досягнення довготривалого ефекту необхідно поєднувати контрольні заходи з екологічною стратегією, що включає рекультивацію, охорону біорізноманіття та просвітницьку діяльність. Застосування сучасних технологій, таких як геоінформаційні системи, дис-

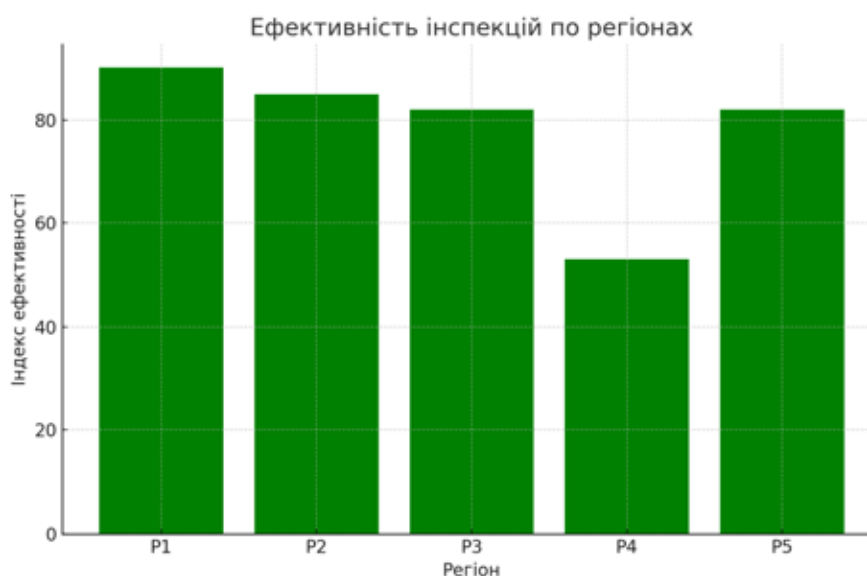


Рис. 1. Ефективність інспекцій по регіонах

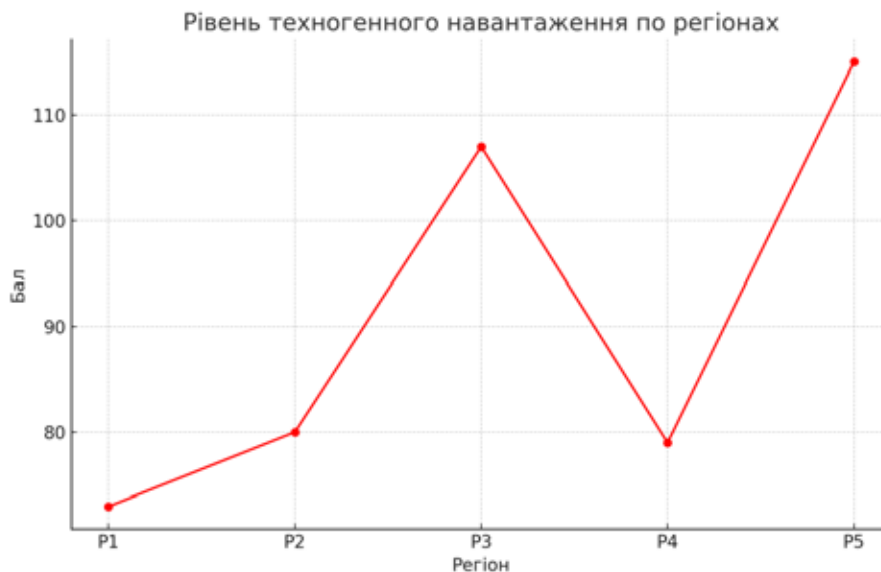


Рис. 2. Рівень техногенного навантаження по регіонах

танційне зондування та екологічне моделювання, значно посилює можливості природоохоронних органів у протидії техногенним ризикам.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження мають вагоме практичне значення та можуть бути використані для підвищення ефективності природоохоронного

інспектування і формування екологічної політики, орієнтованої на зміцнення стійкості ландшафтів до техногенного навантаження. Крім того, результати дослідження можуть бути корисними для органів місцевого самоврядування, підприємств та громадських організацій у реалізації стратегій сталого розвитку та екологічної безпеки територій.

Література

1. Герасимчук З. В., Молчанова І. Ю., Бондаренко В. І. Екологічний моніторинг: навч. посіб. МОН України, Київ: нац. ун-т ім. Т. Шевченка. Київ: Либідь, 2020. С. 256.
2. Маринич О. М., Тимченко З. М., Преображенський В. С. Основи ландшафтної екології: навч. посіб. МОН України, Харків: нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна. Харків: Право, 2019. С. 312.
3. Стецюк Л. Ф., Ковальчук І. П., Шевчук В. П. Вплив техногенного навантаження на ґрунтові та гідрологічні системи: монографія. МОН України, Нац. ун-т біоресурсів і природокористування України. Київ: Центр учбової літератури, 2021. С. 224.
4. Ісасв А. С., Ковтун Л. М. Геоінформаційні технології в екології: навч. посіб. МОН України, Черніг. нац. технол. ун-т. Чернігів: Десна Поліграф, 2022. С. 198.
5. Грінченко С. І., Літвінова О. А. Проблеми екологічного інспектування в Україні: аналіт. доп. НАН України, Ін-т проблем природокористування та екології. Дніпро: Видавництво НГУ, 2023. С. 143.
6. Вітенко, В. А., Миколайко, В. П., Подзерей, Р. В., Парахненко, В. Г., Пясецький, П. І., Моргун, А. В. Аналіз дендрофлори Дослідної станції тютюнництва ННЦ «ІЗ НААН»; України. Науковий вісник НЛТУ України: збірник наукових праць. Львів, 2024. Вип. 34(1). С. 14-19.
7. Парахненко В. Г., Гончарук В. В., Кирпичова І. В., Березенко К. С. Організація і просторовий розподіл живих систем у біоценозах. Наука і техніка сьогодні: (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): 2024. Вип. № 9(37). С. 754-762.
8. Парахненко В. Г., Благополучна А. Г., Голуб Б. В. Екологічні групи рослин за відношенням до світла. Наука і техніка сьогодні: (Серія «Педагогіка», Серія «Право», Серія «Економіка», Серія «Фізико-математичні науки», Серія «Техніка»): 2024. Вип. № 7(35), С. 916-924.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

БІОЛОГІЧНІ РЕСУРСИ РОДУ ГЛОДУ (*CRATAEGUS*) В УМОВАХ СТАРОУШИЦЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ В МЕЖАХ НПП «ПОДІЛЬСЬКІ ТОВТРИ»

Любінська Л.Г., Колодій В.А., Григорчук І.Д., Любинський О.І.,
Горішний М.Л., Власов І.Г., Пакуляк А.Ю.

Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка
вул. Огієнка, 61, 32300, м. Кам'янець-Подільський

kvitkolub@gmail.com, kolodiy.valentyna@kpnu.edu.ua, hryhorchuk@kpnu.edu.ua, lubin.alex@gmail.com,
bioldf23.horishnyi@kpnu.edu.ua, bioldf22.vlasov@kpnu.edu.ua, andypower7723@gmail.co

Представлено результати аналізу біологічних ресурсів глоду (*Crataegus*) в умовах Староушицької територіальної громади в межах НПП «Подільські Товтри». З'ясовано, що у сучасних умовах зростання попиту на натуральні лікарські засоби біологічні ресурси дикорослих лікарських рослин набувають особливого значення. Види роду *Crataegus* є цінною лікарською сировиною, хімічний склад квітів і плодів яких зумовлює широкий спектр фармакологічної дії. У межах Поділля, зокрема півдня Хмельницької області, природні популяції *Crataegus* рясно квітують і плодоносять, що спричиняє інтенсивний попит на сировину. У межах Староушицької територіальної громади місцеве населення традиційно заготовляє квіти і плоди глоду, що зумовлює необхідність оцінки біологічного потенціалу, масштабів заготівлі та розробки рекомендацій щодо сталого використання. Для аналізу біологічних ресурсів *Crataegus* в умовах Староушицької територіальної громади було проведено обстеження територій зростання видів, здійснено збір сировини, визначено біологічний, експлуатаційний запас і допустимий рівень щорічного вилучення. Встановлено поширення п'яти видів роду *Crataegus*: *C. leiomonogina*, *C. monogyna*, *C. pentagyna*, *C. prearmata*, *C. rhipidophylla*. При обстеженні дослідної території визначили, що загальна площа, яку займають види *Crataegus* сумарно складає 25,0 га, а їх середнє проективне покриття на території – 12 %. З'ясовано, що обсяг допустимого використання плодів видів *Crataegus* складає 0,140 т сухої сировини, а квітів – 0,011 т у перерахунку на суху масу сировини. Зроблено висновок, що рясне цвітіння та плодоношення видів *Crataegus* в природних умовах свідчать про значний ресурсний потенціал, що зумовлює інтенсивний попит на їх сировину. Рекомендовано запровадити заходи щодо раціонального використання ресурсів *Crataegus*, які передбачають проведення інвентаризації місць їх заготівлі; розробку інформаційних та просвітницьких матеріалів для місцевого населення; організацію заготівлі сировини за наявності спеціальних дозволів, відповідно до чинного природоохоронного законодавства України. **Ключові слова:** *Crataegus*, НПП «Подільські Товтри», Староушицька територіальна громада, запаси лікарської сировини

Biological resources of the *Crataegus* in the conditions of the Staroushytsky territorial community of the NPP “Podilsky Tovtry”. Lyubinska L., Kolodiy V., Hryhorchuk I., Liubinskiy O., Horishny M., Vlasov S., Pakulyak A.

The results of the analysis of biological resources of *Crataegus* in the conditions of the Staroushytsk territorial community within the framework of the Podilsky Tovtry National Nature Reserve are presented. It was found that in modern conditions of increasing demand for natural medicines, biological resources of wild medicinal plants are of particular importance. *Crataegus* are valuable medicinal raw materials, the chemical composition of the flowers and fruits of which determines a wide range of pharmacological action. Within Podillia, in particular the south of the Khmelnytskyi region, natural populations of *Crataegus* bloom and bear fruit abundantly, which causes intensive demand for raw materials. Within the Staroushytsk territorial community, the local population traditionally harvests hawthorn flowers and fruits, which necessitates the assessment of biological potential, the scale of harvesting and the development of recommendations for sustainable use. To analyze the biological resources of *Crataegus* in the conditions of the Staroushytsk territorial community, a survey of the areas of growth of the species was carried out, raw materials were collected, the biological, operational stock and the permissible level of annual extraction were determined. The distribution of five species of *Crataegus* was established: *C. leiomonogina*, *C. monogyna*, *C. pentagyna*, *C. prearmata*, *C. rhipidophylla*. When examining the experimental area, it was determined that the total area occupied by *Crataegus* species is 25,0 hectares in total, and their average projected coverage on the territory is 12%. It was found that the volume of permissible use of fruits of *Crataegus* species is 0,140 t of dry raw materials, and flowers – 0,011 t in terms of dry mass of raw materials. It is concluded that the abundant flowering and fruiting of *Crataegus* species in natural conditions indicate a significant resource potential, which determines the intensive demand for their raw materials. It is recommended to introduce measures for the rational use of *Crataegus* resources, which include conducting an inventory of their harvesting sites; developing information and educational materials for the local population; organizing the harvesting of raw materials with special permits, in accordance with the current environmental legislation of Ukraine. **Key words:** *Crataegus*, NPP “Podilsky Tovtry”, Staroushytsk territorial community, stocks of medicinal raw materials

Постановка проблеми. У сучасних умовах, коли зростає попит на натуральні лікарські засоби, біологічні ресурси дикорослих лікарських рослин набувають особливого значення. Сировинну базу в Україні становлять в основному дикорослі лікарські рос-

лини. Їх заготівля здійснюється як підприємствами, так і окремими фізичними особами [6, 7].

Цінною лікарською сировиною характеризуються види роду Глід (*Crataegus* sp.). Хімічний склад їх квітів та плодів, що є основною сировиною при заго-

тівлі, зумовлює широкий спектр фармакологічної дії. Найбільш вивченими є представники *Crataegus monogyna* та *C. laevigata*, які входять до багатьох офіційних фармакопей світу, зокрема Європейської фармакопеї та Державної фармакопеї України [1, 2]. Препарати на основі глоду рекомендують застосовувати при функціональних розладах серцево-судинної системи, серцевій недостатності, артеріальній гіпертензії, нейроциркуляторній дистонії та як заспокійливий засіб [4].

В умовах Поділля, особливо на півдні Хмельницької області, природні популяції *Crataegus* рясно квітують й регулярно плодоносять, що зумовлює інтенсивний попит на сировину з боку місцевих заготівельників. Водночас нераціональна заготівля лікарських рослин без наукового обґрунтування може призвести до виснаження природних ресурсів.

Актуальність дослідження. Визначення реального біологічного потенціалу рослин роду Глоду, оцінка масштабів їх заготівлі та розробка рекомендацій щодо раціонального використання сировинної бази без шкоди для природних екосистем є актуальним. Особливого значення це питання набуває у межах природоохоронних територій, зокрема Національного природного парку «Подільські Товтри», де в межах Староушицької територіальної громади мешканці традиційно заготовляють квіти та плоди *Crataegus*.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження ґрунтується на актуальній потребі забезпечення сталого використання біологічних ресурсів лікарських рослин, має прикладне значення у контексті розробки екологічно збалансованих підходів до збору лікарської сировини на природоохоронних територіях. Результати дослідження можуть бути основою для розробки локальних нормативів вилучення лікарської сировини та включення окремих ділянок до планів ресурсокористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Є низка досліджень видів роду *Crataegus* L., що стосуються їх поширення, біологічних та екологічних особливостей, хімічного складу тощо. Так, В. М. Меженський та Л. О. Меженська (2013) у своїх дослідженнях вивчали видовий склад роду *Crataegus* L. в Україні та описували екологічно-біологічні характеристики перспективних видів, зокрема *C. submollis* var. *arnoldiana*, для декоративного, плодового та лікарського використання [5]. Дослідженнями А. Soltys-Lelek, та Н. Oliiar (2016) було показано, що на території Національного природного парку «Подільські Товтри» зростає 8 видів та один гібрид з роду Глід: *C. leiomonogina*, *C. lindemaniai*, *C. lipskii*, *C. monogyna*, *C. pentagyna*, *C. s. prearmata*, *C. curvisepala* та гібрид *C. x kyrstostily*. Інші дослідження видів роду *Crataegus*, зокрема *C. klokovii*, стосувалися його виявлення на Правобережній Україні з новими лока-

літетами, розташованими на крутих схилах долини Дніпра [8]. І. В. Дубковецький, Т. В. Тарасенко та В. М. Бадах (2023) вивчали зміну властивостей сировини глоду в процесі сушіння [3].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність значного масиву даних щодо видового складу та фармакологічного використання *Crataegus*, відсутні дослідження щодо біологічних ресурсів дикорослих видів глоду та рівня антропогенного впливу на них, в тому числі на території Староушицької територіальної громади у межах НПП «Подільські Товтри». Це зумовлює потребу у проведенні комплексного вивчення, зокрема оцінки біологічної продуктивності, визначення потенційного експлуатаційного запасу як основи для сталого використання сировини тощо. Тому метою дослідження є оцінка біологічних ресурсів дикорослих видів глоду в межах Староушицької територіальної громади НПП «Подільські Товтри» з урахуванням їх сировинного потенціалу та поширення, а також розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо раціонального використання та збереження цих ресурсів у межах природоохоронної території.

Новизна. Наукова новизна полягає у вперше здійсненій ресурсній оцінці дикорослих популяцій роду *Crataegus* в межах Староушицької територіальної громади НПП «Подільські Товтри», з урахуванням просторового розподілу, біомаси, відтворюваності та антропогенного навантаження. Запропоновано практичні рекомендації щодо сталого вилучення сировини без шкоди для екосистем.

Методологічне або загальнонаукове значення. Запропонований підхід до оцінки біологічних ресурсів може бути адаптований для інших видів лікарських рослин на природоохоронних територіях України. Методика поєднує фітоценотичне картування, визначення фітомаси, фенологічний моніторинг та анкетування місцевих жителів щодо обсягів заготівлі, що дозволяє інтегрувати екологічні й соціальні чинники у стратегію збереження ресурсів.

Виклад основного матеріалу. Обстеження проводилися у 2024 році у період масового цвітіння та плодоношення *Crataegus*. Для дослідження відібрано п'ять ділянок з різними експозиціями та еколого-топологічними умовами (рис. 1).

Територія дослідження, де зростає глід в межах Староушицької територіальної громади, поєднує різні біотопи. Насамперед це кущовий степ, який сформований чагарниковим ярусом з різних видів *Crataegus* та *Rosa canina* L. Ці ділянки сконцентровані понад річками Дністер, Ущиця, Жванчик на вапнякових схилах. Невеликі групи чагарників трапляються на узліссях грабово-дубових лісів, які зростають між селищами Стара Ущиця та Гораївка і на їх околицях.



Рис. 1. Схема розміщення пробних площ дослідження видів роду *Crataegus* в умовах Староушицької територіальної громади

Габітус рослини умовно поділяли на чотири частини (за сторонами світу) та на три частини висотного розподілу (нижня, середня, верхня), що дає можливість ретельно вивчити кількісний склад квітів і плодів. З кожної рослини проводили відбір сировини. Зібрані проби зважували та висушували за загальноприйнятими методиками. Після цього проводили розрахунки для визначення сировинного потенціалу глоду за удосконаленою методикою В.М. Мінарченка [6], відповідно до якої проводиться розрахунок біологічного, експлуатаційного запасу та обсягу допустимого щорічного використання сировини.

Біологічний запас сировини визначали за формулою:

$$БЗ = П \times ЩЗ, \text{ де}$$

БЗ – біологічний запас (кг), П – площа зростання виду (га), ЩЗ – середня щільність запасів (кг/га), переведена у суху масу. Визначення коефіцієнта переходу з сирої маси в суху здійснювалося шляхом висушування зразків сировини згідно з вимогами чинних фармакопейних норм, після чого розраховували коефіцієнт виходу.

Експлуатаційний запас сировини (ЕЗ), що є частиною біологічного запасу, яку допустимо вилучати з природи без критичного впливу на популяцію, для

глоду, як виду з генеративною лікарською сировиною, становить до 90% від БЗ:

$$ЕЗ = БЗ \times 0,9$$

Обсяг допустимого щорічного використання (ОДЩВ) сировини розраховується з урахуванням часу, необхідного для повного відновлення популяції:

$$ОДЩВ = ЕЗ / n, \text{ де}$$

ОДЩВ – обсяг допустимого щорічного використання, ЕЗ – експлуатаційний запас, n – період повного відновлення (у роках). Оскільки для глоду не визначено період відновлення, тобто цвітіння і плодоношення залежить від кліматичних умов і запилювачів, то показник відновлення прирівнюється до 1. Розрахунок даного показника дозволяє забезпечити екологічно збалансоване використання ресурсів і уникнути виснаження природних популяцій у межах особливо цінних територій.

Для визначення запасу лікарської сировини було встановлено вихід сухої сировини квіток та плодів.

Антропогенне навантаження оцінювали за допомогою польових спостережень і опитувань.

В межах Староушицької територіальної громади нами виявлено такі види, як *C. leiomonogina*, *C. monogyna*, *C. pentagyna*, *C. prearmata*,

Таблиця 1

Показники запасу і використання сировини видів *Crataegus* в умовах Староушицької територіальної громади

Вид сировини	Середня щільність запасів, кг/га	Суша сировина, %	Біологічний запас, т	Експлуатаційний запас, т	Обсяг допустимого використання, т сухої сировини
Квіти	2,5	20	0,012	0,011	0,011
Плоди	25,0	25	0,156	0,140	0,140

C. rhipidophylla. Загальна площа, яку займають види *Crataegus* на території дослідження, сумарно складає 25,0 га, а їх середнє проективне покриття – 12 %. При обстеженні різних видів *Crataegus* виявили, що під час цвітіння на плодових гілках формується від 3 до 10 квіток. З'ясовано, що у квітів при сушінні відбувається втрата п'ятої частини маси сировини, а у плодів – четверта частина (табл. 1). Показники запасу і використання сировини видів *Crataegus* в умовах Староушицької територіальної громади представлені в таблиці 1.

Встановлено, що обсяг допустимого використання плодів видів *Crataegus* складає 0,140 т сухої сировини, а квітів – 0,011 т у перерахунку на суху масу сировини.

За результатами опитування виявлено підвищений рівень експлуатації природних ресурсів глоду. Так, жителями селища Стара Ушиця та села Гораївка з описаної території заготовляється до 30 кг квітів та 180 кг плодів.

Головні висновки.

1. У результаті дослідження виявлено п'ять видів глоду, зокрема *C. leiomonogyna*, *C. monogyna*, *C. pentagyna*, *C. prearmata* та *C. rhipidophylla*, які характеризуються стабільним рясним цвітінням і плодоношенням у природних умовах, що вказує на високий біологічний та сировинний потенціал регіону.

2. Встановлено, що загальна площа, яку займають популяції представників роду *Crataegus* у межах

Староушицької територіальної громади НПП «Подільські Товтри», становить 25,0 га, при середньому проективному покритті 12 %, що свідчить про відносно високу щільність насаджень на дослідженій території.

3. За результатами розрахунків допустимих обсягів заготівлі, щорічний потенціал сухої сировини плодів глоду становить 0,140 т, а квітів – 0,011 т, що є достатнім для забезпечення локальних потреб при дотриманні принципів раціонального природокористування.

4. Показано підвищений рівень експлуатації природних ресурсів глоду на досліджуваній території, що вимагає впровадження контрольованих режимів заготівлі та розробку рекомендацій щодо допустимих навантажень на популяції *Crataegus*.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження можуть бути інтегровані до ресурсних паспортів лікарських рослин НПП «Подільські Товтри» та використані для формування локальних нормативів заготівлі сировини в межах громад; використані у створенні навчальних, освітніх і просвітницьких програм, спрямованих на формування екологічної відповідальності населення та збереження біорізноманіття; а запропонована методика ресурсної оцінки може використовуватися для інших видів лікарських рослин у межах природоохоронних територій України.

Література

1. Державна Фармакопея України : в 3 т. Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». 2-е вид. Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2015. Т. 1. 1128 с.
2. Державна Фармакопея України : в 3 т. Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів». 2-е вид. Харків: Державне підприємство «Український науковий фармакопейний центр якості лікарських засобів», 2014. Т. 3. 732 с.
3. Дубковецький І. В., Тарасенко Т. В., Бадах В. М. Дослідження термінів придатності до споживання плодів глоду після терморадіаційно-конвективного сушіння. Наукові праці Одеського національного технічного університету. 2023. Т. 87, Випуск 1. С. 69–75.
4. Ковальов, В. М. Фармакогнозія з основами біохімії рослин : підручник для студ. вищих фармац. установ освіти та фармац. факультетів вищих мед. установ освіти III-IV рівнів акредитації. В. М. Ковальов, О. І. Павлій, Т. І. Ісакова; за ред. : В. М. Ковальова. Х. : Прапор; НФаУ, 2000. 704 с.
5. Меженська Л. О., Меженський В. М. Рід Глід (*Crataegus* L.) в Україні: інтродукція, селекція, еколого-біологічні особливості. Київ : ЦП «Компринт», 2013. 234 с.
6. Мінарченко В. М., Середя П. І. Ресурсознавство. Лікарські рослини : навчально-методичний посібник. К. : Фітосоціоцентр, 2004. 319 с.
7. Сучасна фітотерапія : навч. посібник. С. В. Гарна, І. М. Владимірова, Н. Б. Бурд [та ін.]. Харків : Друкарня Мадрид, 2016. 580 с.
8. Шевчик О., Соломаха І. Сучасне поширення *Crataegus klokovii* на Правобережній Україні. Науковий вісник Чернівецького університету. Біологія. 2019. Вип. 11(1). С. 107-111.
9. Softys-Lelek A., Oliiar H. The species of the genus *Crataegus* L. in the National Nature Park 'Podilskyi Tovtry' (Podolian Hills, Western Ukraine). Biodiversity: Research and Conservation. 2016. Vol. 44. P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.1515/biocr-2016-0019>

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЗБЕРЕЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ НА ПРИРОДООХОРОННИХ ТЕРИТОРІЯХ У МЕЖАХ ЛІСОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Курбет Т.В., Іванюк Р.О., Кагукіна А.М.
Державний університет «Житомирська політехніка»
вул. Чуднівська, 103, 10005, м. Житомир
org_vvm@ztu.edu.ua

Сучасний світ зіштовхується зі стрімким зниженням біологічного різноманіття, що відбувається у 100-1000 разів швидше, ніж будь-коли в історії людства. Це явище, спричинене інтенсивним використанням природних ресурсів, глобальними кліматичними змінами, урбанізацією та забрудненням, становить серйозну загрозу для екологічної стабільності та здатності екосистем до самовідновлення. У відповідь на цю кризу, природно-заповідні території (ПЗТ) визнані одним з найефективніших інструментів збереження біорізноманіття на національному та регіональному рівнях. Особливе значення у цьому контексті мають лісові екосистеми, які є осередками високого рівня біологічного різноманіття та містять значну частку ПЗТ України, включаючи види, занесені до Червоної та Зеленої книги України, а також Червоного списку МСОП.

Стаття фокусується на дослідженні ролі створення та збереження природоохоронних територій у межах лісгосподарських підприємств, зокрема на прикладі Житомирської області. Аналіз показує, що рівень заповідності Житомирської області станом на 01.01.2025 року становить лише 4,8 % (299 об'єктів загальною площею 143251,9782 га), що значно нижче середнього показника по Україні (6,88 %) та рекомендованих європейських орієнтирів (21 % у середньому по ЄС). Законом України [33] поставлено амбітне завдання досягти 15 % заповідності України до 2030 року.

Дослідження виявляє, що 68,3 % від загальної кількості об'єктів ПЗФ Житомирської області розташовані на землях лісгосподарських підприємств, що підкреслює їхню ключову роль у збереженні біорізноманіття. Детальний аналіз на прикладі Філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» (загальна площа лісів 67736,8 га) показує, що на її території наявно 25 об'єктів ПЗФ (6 загальнодержавного та 19 місцевого значення), що охоплюють площу 5231,43 га. Ліси природоохоронного, наукового та історико-культурного призначення складають лише 7,3 % від загальної площі лісів цього підприємства. Серед категорій ПЗФ, заказники є найбільш поширеними (84,0 % від загального розподілу заповідних територій), при цьому загальнозоологічні заказники, хоч і найменш численні, займають майже 42,0 % площі природоохоронного статусу. На території лісгоспу зафіксовано численні рідкісні та зникаючі види рослин (наприклад, Лілія лісова, Зозулині черевички справжні) та тварин (наприклад, Видра річкова, Лелека чорний), занесені до Червоної книги України.

Для збереження біологічного різноманіття, Філія «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» здійснює комплекс заходів, включаючи моніторинг 36495,5 га особливо цінних для збереження лісів (ОЦЗ), організацію буферних зон, екологічно орієнтоване лісокористування (вибіркові рубки), відновлення деградованих територій та лісову сертифікацію за стандартами FSC. Результати дослідження надають цінну інформацію для розробки стратегічних природоохоронних заходів, удосконалення екологічно орієнтованого лісокористування та планування розширення заповідного фонду в лісових екосистемах. Це сприятиме забезпеченню балансу між економічними інтересами та екологічною безпекою, що є ключовим для сталого розвитку. *Ключові слова:* біологічне різноманіття, лісові екосистеми, природоохоронні території, зміна клімату, екосистемні послуги, збереження довкілля.

Biodiversity conservation in protected areas within forest ecosystems. Melnyk-Shamrai V., Shamrai V., Kurbet T., Ivaniuk R., Kahukina A.

The modern world faces a rapid decline in biodiversity, occurring 100-1000 times faster than at any other point in human history. This phenomenon, driven by intensive natural resource use, global climate change, urbanization, and pollution, poses a serious threat to ecological stability and the self-restorative capacity of ecosystems. In response to this crisis, protected areas (PAs) are recognized as one of the most effective tools for biodiversity conservation at national and regional levels. Forest ecosystems hold particular significance in this context, serving as hotspots of high biodiversity and encompassing a significant portion of Ukraine's PAs, including species listed in the Red and Green Books of Ukraine, as well as the IUCN Red List.

This article focuses on investigating the role of creating and maintaining protected areas within the boundaries of forestry enterprises, specifically using Zhytomyr Oblast as an example. The analysis shows that, as of January 1, 2025, the protected area coverage in Zhytomyr Oblast is only 4.8 % (299 objects totaling 143,251.9782 ha). This is significantly lower than the average for Ukraine (6.88 %) and recommended European benchmarks (21 % on average across the EU). Ukrainian law [33] has set an ambitious goal to achieve 15 % protected area coverage for Ukraine by 2030.

The study reveals that 68.3 % of all PA objects in Zhytomyr Oblast are located on lands managed by forestry enterprises, underscoring their crucial role in biodiversity conservation. A detailed analysis, using the example of the "Zviahelsky Forestry Enterprise" branch of "Forests of Ukraine" SE (total forest area 67,736.8 ha), indicates that it contains 25 PA objects (6 of national and 19 of local significance), covering an area of 5,231.43 ha. Forests designated for conservation, scientific, and historical-cultural purposes account for only 7.3 % of the enterprise's total forest area. Among PA categories, nature reserves are the most common (84.0 % of the total distribution of protected areas). While general zoological reserves are the least numerous, they occupy almost 42.0 % of the protected area with conservation status. Numerous rare and endangered plant species (e.g., Martagon Lily, Lady's Slipper Orchid) and animal

species (e.g., Eurasian Otter, Black Stork), listed in the Red Book of Ukraine, have been recorded within the forestry enterprise's territory.

To conserve biodiversity, the "Zviahelsky Forestry Enterprise" branch of "Forests of Ukraine" SE implements a range of measures, including monitoring 36,495.5 ha of High Conservation Value Forests (HCVF), establishing buffer zones, applying ecologically oriented forest management (selective logging), restoring degraded areas, and pursuing FSC forest certification. The research findings provide valuable information for developing strategic conservation measures, improving ecologically oriented forest management, and planning the expansion of the protected area network within forest ecosystems. This will help ensure a balance between economic interests and environmental security, which is key to sustainable development. *Key words:* biodiversity, forest ecosystems, protected areas, climate change, ecosystem services, environmental conservation.

Постановка проблеми. Необхідність збереження біологічного різноманіття на сучасному етапі розвитку суспільства набуває все більшої уваги серед дослідників, так і серед інших зацікавлених сторін – державних органів, природоохоронних організацій, громадськості. Зараз спостерігається стрімке погіршення стану довкілля внаслідок комплексу негативних антропогенних факторів: інтенсивного використання природних ресурсів, глобальних кліматичних змін, зростання масштабів урбанізації, деградації середовищ існування та забруднення природних екосистем. Ключовим елементом екологічної стабільності та основою для функціонування природних екосистем є біологічне різноманіття. Відмічено, що нинішнє зменшення біологічного різноманіття в 100-1000 разів швидше, ніж будь-коли в історії людства [1].

Одним із найбільш дієвих механізмів збереження біологічного різноманіття на національному та регіональному рівнях є створення та функціонування природно-заповідних територій, які забезпечують охорону цінних природних комплексів і рідкісних видів рослинного та тваринного світу. Лісові екосистеми характеризуються високим рівнем біологічного різноманіття, що зумовило концентрацію значної частини територій природно-заповідного фонду України саме в межах лісових масивів. Саме тут зберігаються типові та унікальні види рослин, тварин, грибів і угруповань, багато з яких занесені до Червоної та Зеленої книги України, Червоного списку Міжнародного союзу охорони природи.

Вивчення розподілу природно-заповідних територій за категоріями, оцінка їх поточного стану та режимів охорони в межах лісових екосистем є актуальним, адже дає можливість провести реальну оцінку внеску цих територій щодо збереження біологічного різноманіття та сприяє інтеграції лісогосподарської діяльності до реалізації принципів сталого розвитку та охорони природи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Втрата біологічного різноманіття є однією з найгостріших глобальних проблем сучасності. Вона тісно пов'язана з деградацією екосистемних функцій, зниженням здатності природи до самовідновлення та порушенням регуляторних механізмів, що є критично важливими для сталого використання природних ресурсів і забезпечення життєдіяльності людини. В кінці ХХ століття в суспільства виникли серйозні занепокоєння щодо подальшої втрати біологічного

різноманіття, що стало передумовою прийняття Конвенції про охорону біологічного різноманіття [2]. Цілями Конвенції є збереження біологічної різноманітності, стійке використання його компонентів і спільне отримання на справедливий і рівній основі вигод, пов'язаних з використанням генетичних ресурсів, у тому числі шляхом надання необхідного доступу до генетичних ресурсів і шляхом належної передачі відповідних технологій з урахуванням усіх прав на такі ресурси і технології, а також шляхом належного фінансування [3].

Біологічне різноманіття забезпечує нас важливими екосистемними послугами: продовольством, ліками, родючими ґрунтами для вирощування їжі, що забезпечується за рахунок живих систем і взаємодії видів, від найдрібніших мікроорганізмів до великих хижаків. Воно відіграє важливу роль у збереженні цих ґрунтів від руйнування водою чи вітром. Крім того, саме в екосистемах відбувається вирішальна частина кругообігу вуглецю, води та інших важливих речовин, які беруть участь у формуванні місцевого та глобального клімату [4].

У роботі [5] здійснено оцінку ролі біологічного різноманіття у забезпеченні екосистемних послуг, де основний фокус дослідження стосується саме збереження та відновлення біорізноманіття. Екосистемні послуги лісів – це всі користі та вигоди, які суспільство може отримати від лісових екосистем. Вони поділяються на кілька основних категорій [6]: регулюючі (очищення повітря, регулювання клімату, захист від ерозії ґрунтів та інші); забезпечувальні (деревина, ягоди, гриби, дикі звірі, лікарські рослини); підтримуючі (збереження біологічного різноманіття, підтримка кругообігу та інше) та культурні (туризм, відпочинок, просвіта та ін.). Отже, лісові екосистеми виконують життєво важливі функції для екологічної стабільності та здоров'я населення [7].

Сьогодні науковці виділяють ряд загроз щодо збереження біологічного різноманіття України [8–10]: знищення природних середовищ існування тварин і місць зростання рослин; фрагментація біотопів, ландшафтів, екосистем; деградація природних середовищ існування; експлуатація видів, їх популяцій і рослинних угруповань; поширення чужорідних видів; розповсюдження хвороб, шкідників і паразитів серед видів природної флори та фауни; низький рівень природоохоронної кваліфікації та екологічної свідомості населення. Для лісових екосистем додатково науковці виділяють наступні про-

блемні питання [11, 12]: лісові пожежі; екологічно необґрунтовані системи рубок і заготівлі недержавної продукції лісу; неефективне лісовідновлення; вилучення лісових земель для цілей, не пов'язаних з лісовим господарюванням; зниження і втрата здатності лісу до самовідновлення; нелегальні рубки, браконьєрство та інші види несанкціонованого лісокористування, вилучення з лісових насаджень популяцій вразливих видів і видів, що охороняються; антропогенний вплив на лісові об'єкти (забруднення атмосфери, гідромеліорацію, випас худоби, застосування пестицидів); нерегульовану рекреацію; «бурштинова лихоманка»; зниження стійкості лісів до впливу несприятливих зовнішніх чинників, масове поширення грибних хвороб і комах-шкідників.

Автори статей [13–16] переконанні, що сучасні зміни клімату суттєво впливають на збереження та відновлення біологічного різноманіття, бо такі кліматичні зміни підсилюють дію інших негативних факторів на біологічне різноманіття та порушують стабільність розвитку екосистеми в цілому.

В працях багатьох вітчизняних дослідників [17–28] природно-заповідні території розглядаються як фундаментальний інструмент збереження біологічного різноманіття, вивчається видове різноманіття та роль фітоінвазій на цих територіях. Особливо дієвими є заповідники в тропічних регіонах та густонаселених біорізноманітних зонах [29, 30], де вони захищають цілісність екосистем та специфічні типи середовищ існування, критично важливі для виживання рідкісних і загрозливих видів. Науковцем [31] запропоновано новий підхід до збереження біологічного різноманіття, який ґрунтується на аналізі заповідних об'єктів як біотопів, створення, організація та функціонування заповідних територій та об'єктів має бути на основі категорій поліфункціонального типу з різними режимами охорони.

Отже, створення нових та розширення існуючих територій природно-заповідного фонду є важливим та ефективним інструментом для збереження біологічного різноманіття в умовах зростання антропогенного навантаження та змін клімату. Особлива увага, має приділятися природоохоронним територіям, що розміщуються на землях лісового фонду, бо саме лісові екосистеми характеризуються високим рівнем видового багатства, екологічної цінності та здатністю підтримувати екологічну рівновагу, поглинати вуглець, регулювати мікроклімат та забезпечувати сталість природних процесів.

Метою статті є вивчення необхідності створення та збереження природоохоронних територій в межах лісгосподарських підприємств, а також оцінка їх ролі у забезпеченні збереження та відновлення біологічного різноманіття в сучасних умовах змін клімату та екологізації лісгосподарської діяльності. Об'єктом досліджень: природоохоронні території у межах лісових екосистем Житомирської області. Предмет досліджень – закономірності функціону-

вання природоохоронних заходів, спрямованих на збереження біологічного різноманіття у лісових екосистемах.

Новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримано комплексний аналіз розподілу природно-заповідних територій у межах лісгосподарського підприємства Житомирської області та розглянуті шляхи вдосконалення системи охорони біологічного різноманіття в межах лісових екосистем. Результати дослідження можуть бути використані лісгосподарськими підприємствами для розроблення стратегічних природоохоронних заходів, вдосконалення екологічно орієнтованого лісокористування та планування розширення заповідного фонду в межах лісових екосистем.

Методика досліджень. Дослідження проводилися шляхом збирання інформації з статистичних щорічників щодо охорони та відтворення біологічного різноманіття, екологічних паспортів, звітів про лісгосподарську діяльність лісових господарств, опрацювання літературних джерел, інтернет-ресурсів та розробки пропозицій щодо відновлення біологічного різноманіття на лісових територіях в умовах невизначеності.

Виклад основного матеріалу. Природно-заповідний фонд Житомирської області протягом останніх років постійно зростає (рис. 1), і станом на 01.01.2025 року кількість заповідних територій та об'єктів становить 299, загальною площею 143251,9782 га. Рівень заповідності території становить лише 4,8 %, що є нижчим за середній показник по Україні (6,88 %) та не відповідає рекомендованим орієнтирам, визначеним Конвенцією про охорону біологічного різноманіття [3] та Державною стратегією регіонального розвитку на 2021-2027 роки [32]. В більшості держав-членів Європейського Союзу це показник у середньому 21 % від їх загальної площі, тому Законом [33] поставлено завдання досягти на 2030 рік 15 % заповідності України. Це є необхідним для забезпечення ефективного збереження біологічного різноманіття та сталого функціонування природних екосистем.

Природно-заповідний фонд Житомирської області охоплює різноманітні форми охоронюваних територій, які відіграють важливу роль у збереженні біологічного та ландшафтного різноманіття та природної спадщини регіону (рис. 2). Серед шести основних категорій об'єктів особливої охорони найбільш численними є заказники, що свідчить про переважне використання саме цієї форми заповідання для охорони цінних природних комплексів. Нижче наведено розподіл заказників за типами (рис. 3), що дозволяє краще оцінити їх функціональну спрямованість та екологічну значущість. Заказники виступають саме тим елементом природно-заповідного фонду, що має найкращу адаптивну пристосованість до створення на будь-яких за розміром територіях та завдяки різним типам мають кращу функціональну направле-

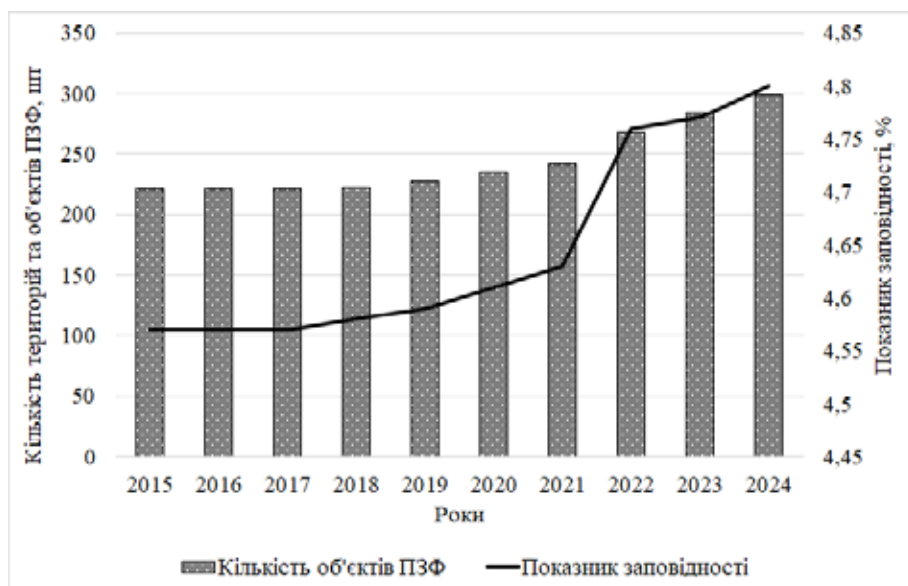


Рис. 1. Динаміка природно-заповідного фонду Житомирської області

Джерело: побудовано авторами на основі власних досліджень

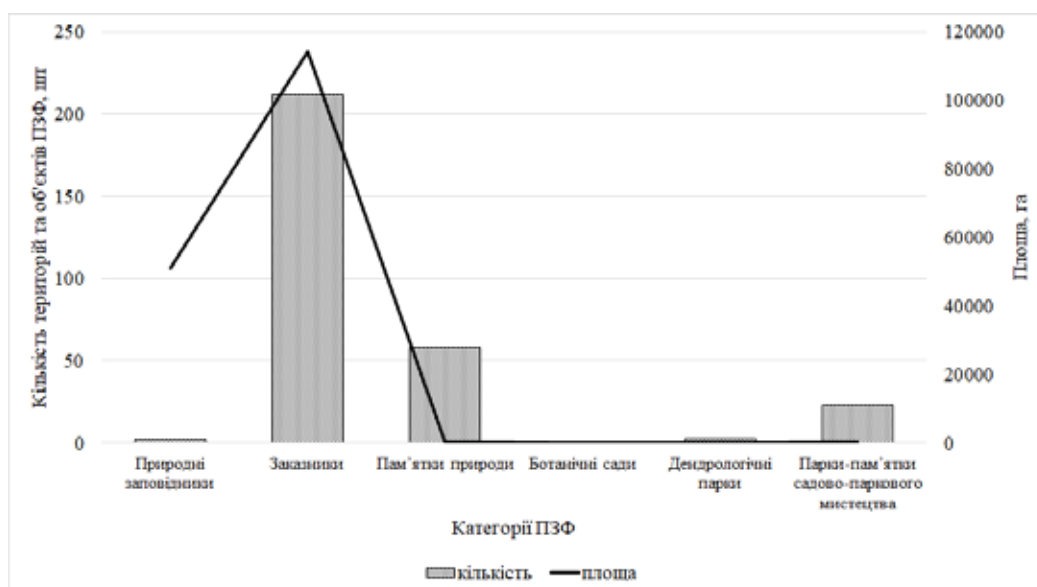


Рис. 2. Розподіл природоохоронних територій Житомирської області

Джерело: побудовано авторами на основі власних досліджень

ність щодо збереження біологічного різноманіття, а охоронний режим дає можливість збалансовано поєднувати охорону природи з окремими видами традиційного природокористування.

Більшість територій та об'єктів природно-заповідного фонду Житомирської області – 68,3 % від їх загальної кількості – розташовані на землях, що перебувають у користуванні лісгосподарських підприємств Житомирської області. Господарська діяльність лісових господарств спрямована на цілеспрямоване та раціональне виконання повного комплексу лісгосподарських, лісовідновлювальних і лісозаготівельних заходів з урахуванням науково-технічних

досягнень і передового досвіду, що сприяє сталому використанню, відтворенню лісових ресурсів та охороні навколишнього природного середовища. Водночас на територіях цих підприємств розташована значна кількість об'єктів природно-заповідного фонду, які потребують особливої уваги, адже їх основною метою є збереження біологічного різноманіття, охорона рідкісних та зникаючих видів флори і фауни, а також підтримання природної рівноваги в екосистемах. Раціональне поєднання господарської діяльності з природоохоронними функціями є важливим завданням лісгосподарських підприємств, адже забезпечення екологічної стійкості лісів

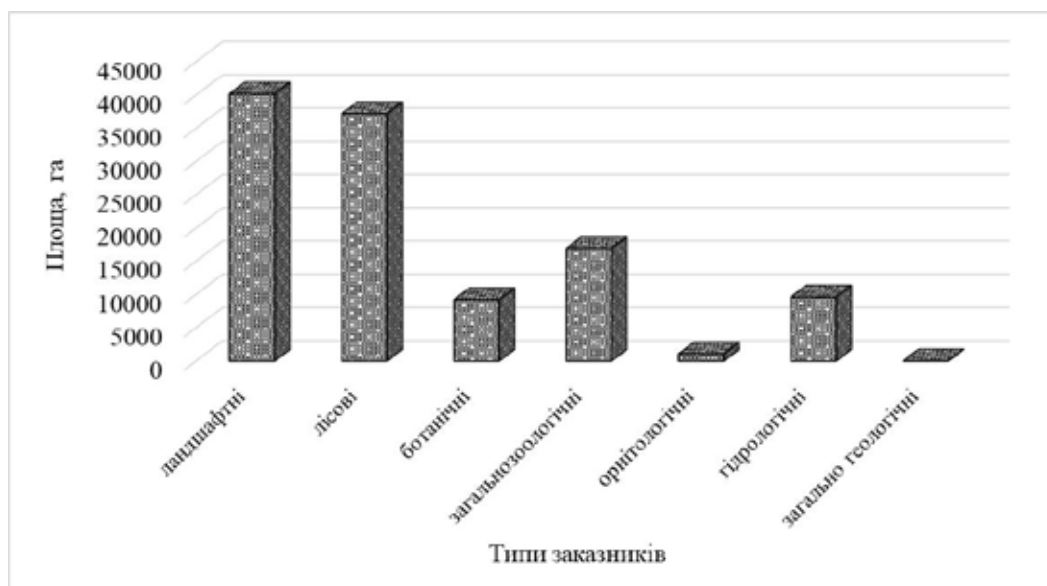


Рис. 3. Розподіл заказників в Житомирській області за типами

Джерело: побудовано авторами на основі власних досліджень

неможливе без збереження цінних природних територій. Такий підхід відповідає принципам сталого розвитку і сприяє реалізації міжнародних та національних зобов'язань у сфері охорони довкілля.

Саме тому вивчення кількості, площі та функціонального призначення об'єктів природно-заповідного фонду в межах окремих лісгосподарських підприємств є надзвичайно важливим. Такий аналіз дозволяє не лише оцінити рівень природоохоронного навантаження на конкретне господарство, а й виявити потенційні загрози для збереження біологічного різноманіття, визначити пріоритетні напрямки охорони природи та удосконалити підходи до управління цими територіями. Крім того, це сприяє інтеграції природоохоронних завдань у загальну стратегію сталого розвитку лісового господарства, забезпечуючи баланс між економічними інтересами та екологічною безпекою

Для дослідження нами було обрана Філія «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України», яке розташоване в західній частині Житомирської області на території п'яти адміністративних районів: Звягельський, Олевський, Баранівський, Ємільчинський, м. Звягель. Філія «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» відповідно до поділу лісів за категоріями лісу становить площу 67736,8 га, з них:

- ліси природоохоронного, науково та історико-культурного призначення – 4929 га;
- рекреаційно-оздоровчі ліси – 6626,4 га;
- захисні ліси – 1948,8 га;
- експлуатаційні ліси – 54232,6 га.

За даними лісовпорядкування площа лісів природоохоронного, науково та історико-культурного призначення становить лише 7,3 %. Для цих лісів

встановлено два режими використання: з особливим режимом користування (пам'ятки природи) та з обмеженим режимом користування (заказники). Так, на території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» наявно 25 територій та об'єктів природно-заповідного фонду (табл. 1), з них 6 об'єктів загальнодержавного (їх площа становить 3318 га) та 19 об'єктів місцевого значення (площею 3820,76 га).

Найбільш поширеними на території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» є заказники, їх частка становить 84,0 % від загального розподілу заповідних територій. Основною метою створення цих заказників є [34]: збереження типових для західної частини Житомирського Полісся суходільних та заболочених лісів, що займають окремі масиви мезотрофних та мезоевтрофних боліт (ландшафтні заказники «Федорівський», «Пікельський», «Партизанський», «Урочище біля трьох дуба»); збереження в природному стані унікальних, високобонітетних, старовікових та цінних деревостанів (модрина, ялини, сосни, дуба, осики, берези) (лісові заказники «Туганівський», «Міхеївський», «Сторожівський», «Сапожинський», «Ліс над Случчю», «Ботанічна», «Курчицький», «Мокренський», «Урочище зіркове»); збереження рідкісних видів рослин занесених до Червоної книги України та рослинних угруповань занесених до Зеленої книги України (ботанічні заказники «Городницький», «Страусове перо», «Вересна»); збереження рідкісних видів тварин занесених до Червоної книги України («Казява», «Кленовський»); охорона та збереження в природному стані низинного сфагнового болота та мозаїчних обводнених ділянок, збереження заплавного ланд-

Таблиця 1

Природоохоронні території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України»

Категорії об'єктів ПЗФ	Об'єкти ПЗФ					
	загальнодержавного значення		місцевого значення		разом	
	кіль-кість,	площа, га	кіль-кість,	площа, га	кіль-кість,	площа, га
	од.	усього	од.	усього	од.	усього
Заказники, усього	4	3261	17	1907,3	21	5168,3
у тому числі:	—	—	—	—	—	—
ландшафтні	—	—	4	718,7	4	718,7
лісові	1	245	8	576,4	9	821,4
ботанічні	1	352	2	85,2	3	437,2
загальнозоологічні	1	1859	1	296	2	2155
орнітологічні	—	—	—	—	—	—
ентомологічні	—	—	—	—	—	—
іхтіологічні	—	—	—	—	—	—
гідрологічні	1	805	2	231	3	1036
загально геологічні	—	—	—	—	—	—
палеонтологічні	—	—	—	—	—	—
карстово-спелеологічні	—	—	—	—	—	—
Пам'ятки природи, усього	1	36	1	0,03	2	36,03
у тому числі:	—	—	—	—	—	—
комплексні	—	—	—	—	—	—
ботанічні	1	36	1	0,03	2	36,03
зоологічні	—	—	—	—	—	—
гідрологічні	—	—	—	—	—	—
геологічні	—	—	—	—	—	—
Дендрологічні парки	—	—	1	6,1	1	6,1
Парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва	1	21	—	—	1	21
РАЗОМ	6	3318	19	1913,43	25	5231,43

Джерело: створено авторами на основі аналізу [34, 35]

шафту (гідрологічні заказники «Червоновільський», «Іванівський», «Мицьківський»).

Розподіл заказників за типами (рис. 4) свідчить, що найчастіше зустрічаються лісові заказники, а найменш поширеними є загальнозоологічні заказники. Проте, аналіз розподілу заказників за площею має інші закономірності, хоча і загальнозоологічні заказники зустрічаються найменше вони займають майже 42,0% площі території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» яка має природоохоронний статус. Рангований ряд типів заказників за зростання заповідної площі має наступний вигляд: ботанічні < ландшафтні < лісові < гідрологічні < загальнозоологічні.

На території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» зустрічаються дві ботанічні пам'ятки природи, які розміщуються на площі 36,01 га. Так, пам'ятка природи «Богданів дуб» створена з метою охорони, збереження та викори-

стання в наукових цілях дуба черешчатого (*Quercus robur* L.) віком 400-500 років, а інша пам'ятка природи «Модрина» має за мету збереження в природному стані високоповнотних штучних насаджень модрина європейської (*Larix decidua*).

Дендрологічний парк «Пілява» створений ще в 70-х роках ХХ століття з метою охорони, збереження та раціонального використання понад 75 видів дерев і кущів, які є типовими та унікальними для Полісся. Парк-пам'ятка садово-паркового мистецтва «Городницький» засновано вкінці 902-х років ХІХ століття, але природоохоронний статус отримав в 1960 році, основна мета створення збереження понад 40 деревних і 20 чагарникових порід.

На території лісонасаджень філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» зафіксовано наявність рідкісних та зникаючих видів рослин і тварин, що перебувають під охороною відповідно до чинного законодавства. До рослинного

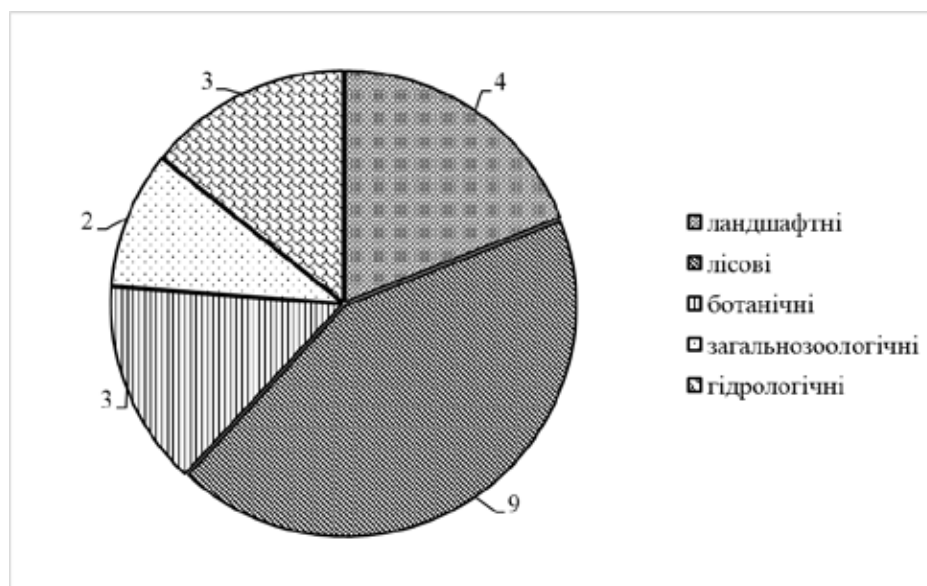


Рис. 4. Розподіл заповідників за типами на території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України»
Джерело: створено авторами на основі аналізу [34, 35]

тому Червоної книги України відносяться [34]: Баранець звичайний (*Huperzia selago* (L.) Bernh. ex Schrank et Mart.), Билинець довгорогий (*Gymnadenia conopsea* (L.) R.Br.), Гніздівка звичайна (*Neottia nidus-avis* (L.) Rich.), Зозулині черевички справжні (*Cypripedium calceolus* L.), Лілія лісова (*Lilium martagon* L.), Любка дволиста (*Platanthera bifolia* Rich.), Пальчатокорінник травневий (*Dactylorhiza majalis* (Rchb.) P.F. Hunt et Summerhayes), Підсніжник білосніжний (*Galanthus nivalis* L.), Плаун річний (*Lycopodium annotinum* L.), Сон розкритий (*Pulsatilla patens* (L.) Mill.), Шейхцерія болотна (*Scheuchzeria palustris* L.) та Цибуля ведмежа (*Allium ursinum* L.). До тваринного тому Червоної книги України відносяться [34]: Вечірниця руда (*Nyctalus noctula* (Schreber, 1774), Видрарічкова (*Lutra lutra* L.), Глушець (*Tetrao urogallus* (Linnaeus, 1758), Журавель сірий (*Grus grus* (L.)), Жовна зелена (*Picus viridis* (Linnaeus, 1758), Зміїд (*Circaetus gallicus* (Gmelin, 1788)), Лелека чорний (*Ciconia nigra* (Linnaeus, 1758)), Мідянка (*Coronella austriaca* Laurenti), Підорлик малий (*Aquila pomarina* Brehm, 1831), Пугач (*Bubo bubo* (L.)), Сичикгробець (*Glaucidium passerinum* (L.) та Шуліка чорний (*Milvus migrans* (Boddaert, 1783)).

На території філії «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» виділено та охороняється 36495,5 га особливо цінних для збереження лісів (ОЦЗ), за станом яких щороку здійснюється моніторинг. Так, на території лісового господарства виділено 6 ОЦЗ [34]:

– ОЦЗ 1 – Видове різноманіття – площа 5360,2 га та має за мету збереження ендемічних, рідкісних видів та видів, що перебувають під загрозою, або зникають, які є важливими для суспільства;

– ОЦЗ 2 – Екосистеми та їхні мозаїки ландшафтного рівня – метою є збереження цілісних лісових ландшафтів і великих екосистем, що мають високу природоохоронну цінність;

– ОЦЗ 3 – Екосистеми та оселища – площа 30354,2 га, основна мета збереження оселищ зникаючих або під загрозою зникнення видів;

– ОЦЗ 4 – Критичні послуги екосистем – площа 783,1 га, збереження екосистем, що направлене на дотримання важливих екосистемних послуг лісів: запобігання ерозії, захист водозаборів, продукування кисню та інше;

– ОЦЗ 5 – Потреби громади – забезпечення побічними ресурсами лісу та місцями для відпочинку (рекреації) місцевих жителів;

– ОЦЗ 6 – Культурні цінності – основна мета це збереження цих територій як культурної та духовної цінності для місцевих громад.

Підприємство визначає потенційні загрози довкіллю від господарської діяльності та впроваджує дієві заходи для їх запобігання, а у разі виникнення впливів – пом'якшує або усуває їх відповідно до рівня ризику, масштабу та інтенсивності. Заходи з охорони та відновлення, зокрема і на плантаційних територіях, відповідають охоронному статусу, екологічній цінності та характеру впливу діяльності на ландшафтному рівні.

Філія «Звягельське лісове господарство» ДП «Ліси України» з метою збереження біологічного різноманіття та природоохоронних територій у лісових екосистемах здійснює наступні заходи:

– збереження особливо цінних для збереження лісів (ОЦЗ) та їх моніторинг;

– організація буферних та охоронних зон навколо вразливих біотопів;

- облік рідкісних, зникаючих і індикаторних видів флори та фауни;
- екологічно орієнтоване лісокористування (застосування вибіркових рубок замість суцільних);
- відновлення природних екосистем шляхом заліснення деградованих територій з використанням місцевих видів;
- оцінка впливу на довкілля (ОВД) перед початком діяльності та подальший післяпроектний моніторинг;
- проведення освітніх заходів, еко-турів, акцій зі збереження природи;
- організація ведення лісового господарства відповідно до стандартів FSC та лісова сертифікація.

Висновки. Результати вивчення матеріалів щодо збереження біологічного різноманіття в лісових екосистемах дозволяють зробити наступні висновки:

1. Стрімке зменшення біологічного різноманіття у 100-1000 разів швидше, ніж будь-коли в історії людства, вимагає невідкладних заходів, серед яких створення та розширення природно-заповідних територій є одним з найефективніших інструментів.
2. Рівень заповідності Житомирської області становить лише 4,8 % (299 об'єктів ПЗФ загальною

площею 143251,9782 га), що значно нижче середнього показника по Україні (6,88 %) та рекомендованих європейських орієнтирів (21 %), підкреслюючи необхідність досягнення 15 % заповідності України до 2030 року.

3. Лісові екосистеми, на які припадає 68,3 % об'єктів ПЗФ Житомирської області, відіграють ключову роль у збереженні біологічного різноманіття, проте частка лісів природоохоронного призначення у таких господарствах, як Філія «Звягельське лісове господарство», залишається низькою (7,3 %).

4. Аналіз показує, що 25 об'єктів ПЗФ у Філії «Звягельське лісове господарство» охоплюють 5231,43 га, з яких 84,0 % складають заказники, а загальнозоологічні заказники, хоч і найменш поширені за кількістю, займають значну площу – майже 42,0 % природоохоронних територій.

5. Ефективне поєднання господарської діяльності лісгосподарських підприємств з природоохоронними функціями, включаючи моніторинг 36495,5 га особливо цінних для збереження лісів, застосування екологічно орієнтованих методів лісокористування та лісову сертифікацію, є критично важливим для сталого розвитку та збереження біорізноманіття.

Література

1. Втрата біорізноманіття. URL: <https://surl.lu/ektbqf>. (дата звернення 01.06.2025 р.).
2. Конвенція про охорону біологічного різноманіття від 1992 року URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_030#Text (дата звернення 01.06.2025 р.).
3. Конвенція про біологічне різноманіття. URL: <https://surl.cc/ycrjwo>. (дата звернення 01.06.2025 р.).
4. Бутрик І.Д., Мельник-Шамрай В.В. Вплив змін клімату на біологічне різноманіття. Тези XVIII Всеукраїнської наукової on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених з міжнародною участю «Сучасні проблеми екології», 6 жовтня 2022 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2022. С. 81-82.
5. Безлатня Л. О., Матківський М. П., Лозінська Т.П. Біорізноманіття як основа екосистемних послуг: оцінка, збереження та відновлення. Таврійський науковий вісник. 2024, № 135. Ч. 1. С. 12-19.
6. Іванюк Р.О., Скоковський М.В., Дмитренко С.А., Мельник-Шамрай В.В. Екосистемні послуги лісових екосистем. Тези Всеукраїнської наукової конференції здобувачів вищої освіти та молодих учених «Екологічна безпека та раціональне природокористування», 14 листопада 2024 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2024. С. 38.
7. Іванюк Р.О., Мельник-Шамрай В.В. Вплив воєнних дій на екосистемні послуги лісових екосистем. Всеукраїнська науково-практична онлайн-конференція здобувачів вищої освіти і молодих вчених, присвячена Дню науки, 12-17 травня 2025 року. Житомир: Житомирська політехніка, 2025. С. 219.
8. Царик Й. В. Деякі міркування щодо сучасних підходів до вивчення та збереження біотичного різноманіття. *Біологічні студії*. 2013. т. 7, № 1. С. 227-234.
9. Чайка В. М., Лісовий М. М., Мухаммед М. З. Основні екологічні чинники збіднення біорізноманіття України. *Агроекологічний журнал*. К., 2018. № 3. С. 66-69.
10. Мудревська О. Роль біологічного різноманіття та шляхи його збереження. IV Міжнародна науково-практична конференція «Природничі науки та освіта: сучасний стан і перспективи розвитку», 7-8 листопада 2024 р. Харків, 2024. С. 58-59.
11. Варга Л., Пузир О.О., Лозінська Т.П. Проблеми збереження біорізноманіття лісів. Технології, інструменти та стратегії реалізації наукових досліджень: матеріали конференцій МЦНД (м. Херсон, 20 березня 2020 р.). Міжнародний центр наукових досліджень, 2020. С. 59–61.
12. Букша І. Ф. Теоретичні основи та практичні аспекти моніторингу біорізноманіття лісової рослинності. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*. 2003. Вип. 13.3. С. 69–75.
13. Молчанова К., Лупаренко С. Зміни клімату та їхній вплив на біологічне різноманіття. IV Міжнародна науково-практична конференція «Природничі науки та освіта: сучасний стан і перспективи розвитку», 7-8 листопада 2024 р. Харків, 2024. С. 54-56.
14. Іванюта С. П., Коломієць О. О., Малиновська О. А., Якушенко Л. М. Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь. Київ: НІСД, 2020. 110 с.
15. Пацева І.Г., Кагукіна А.М., Луньова О.В. Тенденції зміни клімату Житомирщини. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. К. : видавничий дім «Гельветика». 2023. Вип. 6(51). С. 156-159.
16. Patseva I., Herasymchuk L., Kahukina A., Patsev I., Valerko R., Ustymenko V. The impact of forest fires in the context of climate change: an interdisciplinary analysis. *Technology Audit and Production Reserves*. 2025. Is. 3(3(83)). P. 25–37.

17. Василюк О. Функціональна класифікації територій природно-заповідного фонду України: історія формування та міжнародний аспект. *GEO&BIO*. 2019. Том 18. С. 3–20.
18. Гетьман В.І. Ландшафтна репрезентативність природно-заповідного фонду України. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2021. № 7(34). С. 71–80.
19. Кирилюк М. О. Картографування природно-заповідного фонду України: сучасний стан та перспективи. *Регіональні проблеми України*. 2019. С. 125–128.
20. Мельник В.В. Аналіз природно-заповідного фонду України та Житомирської області. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2021. № 2(35). С. 125–131.
21. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.В., Пацева І.Г., Курбет Т.В. Оцінка стану природно-заповідного фонду Житомирської області. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. К.: видавничий дім «Гельветика», 2023. № 3(48). С. 108–115.
22. Мельник-Шамрай В.В., Шамрай В.І., Пацева І.Г. Аналіз територіального розподілу об'єктів природно-заповідного фонду об'єднаних територіальних громад Коростенського району Житомирської області. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. К. : видавничий дім «Гельветика». 2023. № 4(49). С. 186–193.
23. Ткачук В. І. Багаторічна динаміка природно-заповідного фонду на території лісгосподарських підприємств Житомирської області. *Лісівництво і агролісомеліорація*. 2007. Вип. 111. С. 235–241.
24. Андреева О. Ю., Марков Ф. Ф., Іванюк Т. М., Корма О. М., Кірейцева Г. В. Різноманіття флори на деяких об'єктах природно-заповідного фонду ДП «Коростенське лісомисливське господарство» Житомирської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2022. 32(4). С. 12–17.
25. Осадчук К.О., Давидова І.В., Корбут М. Б., Бондарчук В.М., Бабяк В.В. Репрезентативність природних екосистем у природно-заповідному фонді Житомирської області. *Технічна інженерія*. 2021. Вип. 2(88). С. 135–147.
26. Герасимчук О.Л. Корбут М.Б. Екологічна стежка як засіб формування екологічної культури особистості. *Проблеми освіти: збірник наукових праць. ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»*. Випуск 91. Вінниця: ТОВ «ТВОРИ», 2019. С. 92–96.
27. Romanchuk L., Ustymenko V., Didenko P., Badzian V. Determination of the main indicators of species diversity in «Drevlyansky» nature reserve's forests. *Scientific Horizons*. 2020. Vol. 7(92). P. 65–73.
28. Хоменко С.В., Бельмега І.В., Кірейцева Г.В., Хрутьба В.О. Роль фітоінвазії для природного біорізноманіття заповідних територій України. *Екологічні науки: науково-практичний журнал*. Видавничий дім «Гельветика», 2024. 1 (52), Том 2. С. 94 – 99.
29. Naughton-Treves L., Holland M., Brandon K. The Role of Protected Areas in Conserving Biodiversity and Sustaining Local Livelihoods. *Annual Review of Environment and Resources*. 2005. Vol. 30. P. 219–252.
30. Beaudrot L, Ahumada JA, O'Brien T, Alvarez-Loayza P, Boeckee K, Campos-Arceiz A, et al. Standardized Assessment of Biodiversity Trends in Tropical Forest Protected Areas: The End Is Not in Sight. *PLoS Biol*. 2016. 14(1).
31. Дідух Я. П. Концепція формування системи заповідних об'єктів з метою збереження біорізноманіття України на екологічних засадах. *Вісник Національної академії наук України*. 2017. № 6. С. 51–60.
32. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки. URL: <https://surl.li/bzzsax>. (дата звернення 01.06.2025 р.).
33. Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року. URL: <https://surl.cc/rckmtw>. (дата звернення 01.06.2025 р.).
34. Звіт для громадськості по моніторингу господарської діяльності та лісів високої природоохоронної цінності по філії «Звягельське лісове господарство» за 2023 рік. URL: <https://surl.lu/nbqhxy>. (дата звернення 01.07.2025 р.).
35. Екологічний паспорт Житомирської області. URL: <https://surl.cc/ysrkaz>. (дата звернення 01.07.2025 р.).

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ РІЧКИ СМОТРИЧ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ РІВНОВАГИ ТА СТАЛОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ В УМОВАХ НПП «ПОДІЛЬСЬКІ ТОВТРИ»

Яцемірська Н.П.

Національний природний парк «Подільські Товтри»
пл. Польський ринок, 6, 32301, м. Кам'янець-Подільський
fedoryk_i15@ukr.net

Робота присвячена дослідженню екологічного стану річки Смотрич у межах Національного природного парку «Подільські Товтри», зокрема на території міста Кам'янець-Подільський та прилеглому району. Метою дослідження є оцінка сучасного екологічного стану водного об'єкта, виявлення основних чинників забруднення та обґрунтування можливих шляхів збереження і відновлення його водних екосистем.

Річка Смотрич, що протікає через екологічно цінні природні комплекси та має велике значення для водопостачання, біорізноманіття та рекреації, є важливою водною артерією для території Національного природного парку «Подільські Товтри».

Екологічний моніторинг стану річки Смотрич є одним із ключових напрямів природоохоронної діяльності Національного природного парку «Подільські Товтри». У рамках цього моніторингу проведено відбір проб води з метою оцінки її якісних характеристик. Основну увагу приділено аналізу фізико-хімічних показників, зокрема визначенню рівня рН, вмісту розчиненого кисню, біохімічного споживання кисню (БСК) та хімічного споживання кисню (ХСК).

Ці показники дозволяють отримати уявлення про рівень забруднення водного об'єкта, його здатність до самоочищення та загальний екологічний стан. Регулярне проведення таких досліджень є важливою умовою для своєчасного виявлення негативних змін у водному середовищі та прийняття ефективних природоохоронних рішень.

Виявлені в результаті моніторингу тенденції дозволяють розробляти науково обґрунтовані заходи щодо збереження та відновлення екосистем річки Смотрич, попереджати небажані наслідки забруднення та посилювати природоохоронну функцію парку.

Результати дослідження доводять необхідність збалансованого підходу до використання та охорони природних ресурсів річки Смотрич. Вони свідчать про важливість врахування тісного взаємозв'язку водного об'єкта з навколишнім середовищем для забезпечення сталого природокористування, збереження високої продуктивності та біологічного різноманіття екосистеми.

Ключові слова: річка Смотрич, національний природний парк, екологічний стан, екосистема.

Ecological monitoring of the smotrych river to ensure ecological balance and sustainable nature use in the conditions of the npp «Podil'ski Tovtry». Yatsimirska N.

The work is devoted to the study of the ecological state of the Smotrych River within the Podilski Tovtry National Nature Park, in particular on the territory of the city of Kamianets-Podilskyi and the adjacent district. The purpose of the study is to assess the current ecological state of the water body, identify the main factors of pollution and substantiate possible ways to preserve and restore its aquatic ecosystems.

The Smotrych River is an important water artery for the territory of the Podilski Tovtry National Nature Park, flowing through ecologically valuable natural complexes and of great importance for water supply, biodiversity and recreation.

Ecological monitoring of the Smotrych River is one of the key areas of environmental protection activities of the Podilski Tovtry National Nature Park. As part of this monitoring, water samples were taken to assess its quality characteristics. The main attention was paid to the analysis of physicochemical indicators, in particular, the determination of pH, dissolved oxygen content, biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD).

These indicators allow us to get an idea of the level of pollution of a water body, its ability to self-purify and the general ecological state. Regular conduct of such studies is an important condition for timely detection of negative changes in the aquatic environment and adoption of effective environmental protection decisions.

The trends identified as a result of monitoring allow us to develop scientifically based measures to preserve and restore the ecosystem of the Smotrych River, prevent undesirable consequences of pollution and strengthen the environmental protection function of the park.

The results of the study emphasize the need for a balanced approach to the use and protection of the natural resources of the Smotrych River. They indicate the importance of taking into account the close relationship of the water body with the environment to ensure sustainable nature use, preservation of high productivity and biological diversity of the ecosystem. *Key words:* Smotrych River, National Nature Park, ecological state, ecosystem.

Постановка проблеми. Річка Смотрич – одна з найбільших приток Дністра, завдовжки 169 км і площею басейну 1800 км². Вона є важливою водною артерією Національного природного парку «Подільські Товтри» та проходить через екологічно цінні природні комплекси. Річка відіграє значну роль

у забезпеченні водопостачання, підтриманні біорізноманіття, рекреаційній діяльності та збереженні природного балансу [1].

Стан водних ресурсів Смотрича загалом задовільний, однак потребує постійного екологічного моніторингу для запобігання деградації екосистем та

забезпечення сталого природокористування в межах НПП «Подільські Товтри».

Історія річки Смотрич налічує мільйони років. У кожному геологічному періоді русло річки змінювало свій напрямок. У силурі (понад 400 млн років тому) води Смотрича текли на південний захід, у кам'яновугільному періоді – на північний захід. Формування сучасного русла розпочалося наприкінці неогену – близько 2-2,5 млн. років тому.

Упродовж останніх сотень тисяч років під впливом різниці висот між рівнем Дністра, який заглибився в палеозойські породи, та положенням його приток, Смотрич інтенсивно вривався в корінні геологічні відклади. Коли річка досягла шарів скам'янілих вапняків, русло стало вузьким, а береги – крутими та скелястими. Після завершення останнього, валдайського зледеніння (близько 10 тис. років тому) долина річки Смотрич поступово вкрилася лісами та чагарниками, сформувавши сучасний ландшафт із високою природною цінністю [2].

Річка Смотрич бере початок із джерел, розташованих поблизу села Андрійківці Хмельницького району, та протікає переважно територією Подільської височини. У верхній частині течії, поблизу витоків, річка формує широку заболочену долину. Заплава часто має переривчастий характер і змінюється в ширині: від 600 м до вузьких ділянок 20-50 м.

Після проходження м. Городок русло річки починає вриватися у тверді гірські породи. У результаті цього долина стає значно вузькою, глибшою, з крутими скелястими берегами – характерна риса середньої течії Смотрича.

У басейні річки створено численні ставки, які використовуються для зрошення сільськогосподарських угідь та рибальства.

На берегах Смотрича в межах Національного природного парку «Подільські Товтри» розташовані об'єкти природно-заповідного фонду державного значення: Циківський ландшафтний заказник, Панівецька дача – ботанічний заказник, Смотрицький каньйон – геологічна пам'ятка природи розташована в долині річки, вирізняється унікальним ландшафтом і високою природоохоронною значущістю.

Ці об'єкти не лише мають високу природоохоронну цінність, а й слугують осередками екологічного просвітництва, сприяючи формуванню екологічної свідомості серед молоді та громади [3].

Актуальність дослідження. Екологічні нормативи якості води річки Смотрич встановлюються з урахуванням природного стану водного об'єкта та спрямовані на досягнення цілей водоохоронної діяльності – збереження або покращення його екологічного благополуччя.

Оцінка екологічного стану річки є важливим етапом у системі екологічного моніторингу і дозволяє визначити рівень антропогенного навантаження на водний об'єкт, виявити потенційні загрози для біорізноманіття, сформувати науково обґрунтовані

заходи щодо охорони та раціонального використання водних ресурсів.

Унаслідок зростання обсягів використання води для господарських потреб різко підвищився рівень забруднення водного середовища. Річки дедалі частіше перетворюються на водосховища – накопичувачі побутових і промислових стоків, забруднених токсичними речовинами та отрутохімікатами. Однією з актуальних проблем є також зростання мінералізації вод та накопичення органічних сполук, що є наслідком недостатнього водообміну.

На сучасному етапі, в умовах інтенсифікації негативного антропогенного впливу, річка Смотрич потребує комплексного та поглибленого дослідження. Основною метою такого вивчення є стабілізація та відновлення її структурно-функціональних характеристик, а також розробка і впровадження практичних заходів, спрямованих на відновлення та підтримання екосистемної стійкості водного об'єкта.

Мета роботи полягала у вивченні особливостей формування та функціонування водної екосистеми річки Смотрич в умовах посиленого антропогенного навантаження.

Стан дослідженості питання. Питання оцінки якості води річки Смотрич неодноразово розглядалося в екологічних дослідженнях, пов'язаних із вивченням стану поверхневих вод Поділля. Зокрема у працях регіональних науковців, екологів Національного природного парку «Подільські Товтри» та фахівців Держводагентства України аналізуються зміни фізико-хімічних показників води під впливом антропогенних навантажень.

Основну увагу приділено вивченню таких показників як рН, вміст розчиненого кисню, біохімічне (БСК) та хімічне (ХСК) споживання кисню, концентрації нітратів, фосфатів, сульфатів, а також загальної мінералізації. Встановлено, що якість води у верхній течії річки, зазвичай, відповідає нормативам екологічної безпеки, тоді як у межах урбанізованих територій, зокрема м. Кам'янець-Подільський, спостерігається зниження якості через надходження стічних вод, побутових та аграрних забруднювачів.

Незважаючи на наявні дослідження, багато аспектів, зокрема сезонна динаміка показників, вплив локальних джерел забруднення, а також довготривалі тенденції зміни складу води, залишаються недостатньо висвітленими. Це обумовлює необхідність поглибленого екологічного моніторингу та комплексного аналізу водної екосистеми річки Смотрич в умовах зростаючого антропогенного навантаження [2, 3, 4].

Наукова новизна. У межах даного дослідження вперше за останні роки здійснено комплексну оцінку екологічного стану вод річки Смотрич у межах Національного природного парку «Подільські Товтри». Проведено систематизований аналіз основних гідрохімічних показників якості води, що дозволило встановити рівень забруднення водного середовища та окреслити ключові екологічні загрози.

Здійснено вимірювання та порівняльний аналіз фізико-хімічних характеристик води: рівня рН, вмісту розчиненого кисню, біохімічного споживання кисню (БСК), хімічного споживання кисню (ХСК).

Отримані результати є важливими для подальшого планування заходів з охорони та відновлення водних екосистем природоохоронної території та можуть слугувати основою для впровадження сталого природокористування в басейні річки Смотрич.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Проведене дослідження відповідає пріоритетним напрямкам забезпечення екологічної безпеки та сталого природокористування, зокрема в частині формування безпечного та екологічно збалансованого підходу до рекреаційного використання природних ресурсів. Особливу увагу приділено річці Смотрич та Смотрицькому каньйону як об'єктам підвищеної природоохоронної цінності, що входять до складу Національного природного парку «Подільські Товтри».

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації рекреаційного навантаження, розроблення природоохоронних заходів та екологічного моніторингу з метою збереження унікального ландшафту, біорізноманіття та водної екосистеми регіону.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Протягом останніх десятиліть спостерігається стійка тенденція до погіршення екологічного стану поверхневих водних об'єктів, що обумовлюється зростаючим антропогенним навантаженням, зміною кліматичних умов та недостатньою ефективністю заходів з охорони водних ресурсів. У цьому контексті вивчення, удосконалення та порівняльний аналіз існуючих методик оцінки стану водного середовища набувають особливої актуальності та підтверджують необхідність впровадження альтернативних і комплексних методів екологічного моніторингу. Вирішення означених завдань можливе лише на основі системного підходу [5].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується означена стаття. Ключовою зміною в новій системі водоохоронного нормування (впровадження положень Водної Рамкової директиви ЄС (2000/60/ЕС) у природоохоронне законодавство), стала відмова від традиційного підходу, що ґрунтувався на класифікації вод за видами водокористування, на користь екологічного підходу. Цей підхід передбачає оцінку якості води на основі характеристик непорушеного (природного) стану водного об'єкта, а також визначення ступеня відхилення від нього під впливом антропогенних факторів – важливий крок у наближенні національного законодавства до європейських екологічних стандартів [6].

Методологічне або загальнонаукове значення. В умовах посиленого антропогенного тиску біоло-

гічна продуктивність водойм істотно знижується, тому вона безпосередньо зв'язана з водністю та якістю води [7].

Проведене дослідження екологічного стану вод річки Смотрич у межах Національного природного парку «Подільські Товтри» сприяє розвитку сучасних наукових підходів до оптимізації рекреаційного навантаження та формуванню ефективних природоохоронних заходів, спрямованих на збереження унікального ландшафту, біорізноманіття та водної екосистеми даної річки.

Запропоновані у роботі методи ґрунтуються на принципах сталого рекреаційного розвитку та екосистемного управління. Застосування цих підходів дозволяє оцінювати якість поверхневих вод відповідно до їх екологічного та хімічного станів, що відповідає вимогам європейського законодавства та має важливе значення для ефективного водокористування, забезпечення екологічної рівноваги та збереження водних екосистем у природоохоронних територіях [8].

Водні ресурси відіграють ключову роль у забезпеченні всіх сфер життєдіяльності людини. Крім того, вода є основним компонентом навколишнього природного середовища, забезпечує функціонування природних екосистем і є необхідною умовою збереження біорізноманіття.

Аналіз міжнародного досвіду свідчить, що формування ефективної правової політики у сфері водопостачання є одним із ключових чинників екологічної безпеки. Комплексне регулювання, засноване на принципах сталого розвитку, інтегрованому управлінні водними ресурсами та відповідності екологічним стандартам, дозволяє зменшити негативний вплив на довкілля та забезпечити довгострокову водну безпеку як для населення, так і для природних екосистем [9, 10].

Виклад основного матеріалу. У межах моніторингу стану забруднення вод річки Смотрич було обрано основні фізико-хімічні параметри, а саме: рівень водневого показника (рН), концентрацію розчиненого кисню, біохімічне споживання кисню (БСК) та хімічне споживання кисню (ХСК). Ці показники дозволяють виявити як рівень органічного навантаження, так і ступінь окислюваності водного середовища.

З метою досягнення цілей і завдань дослідження були визначені три контрольні ділянки відбору проб води:

1. Перша ділянка – у межах міста Кам'янець-Подільський (міський вплив);
2. Друга ділянка – за межами міста, поблизу села Цибулівка (умовно фоновий стан);
3. Третя ділянка – село Панівці Кам'янець-Подільського району (рекреаційна зона нижче за течією).

Результати гідрохімічних досліджень згруповано у таблиці 1.

Таблиця 1

Дослідження води поверхневих водоймищ річки Смотрич в межах НПП «Подільські Товтри»

Ділянка відбору проб води	Рівень водневого показника (рН)	Концентрація розчиненого кисню (мг/дм ³)	Біохімічне споживання кисню (БСК-5) (мгО ₂ / дм ³)	Хімічне споживання кисню (ХСК) (мгО ₂ / дм ³)
м. Кам'янець-Подільський	7,8	5,92	2,0	27,2
с. Цибулівка	8,1	7,84	1,44	48,0
с. Панівці	7,96	7,36	1,2	14,4

Дослідження з визначення показників води виконувались згідно чинних стандартів Державною установою «Хмельницький обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України», Кам'янець-Подільським районним відділом.

Згідно з «Гігієнічними нормативами якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» (затверджено наказом МОЗ України від 02.05.2022 № 721, зі змінами) встановлено:

– у зразках з м. Кам'янець-Подільський та с. Панівці всі показники відповідають нормативним значенням;

– у зразку з с. Цибулівка показник хімічного споживання кисню (ХСК) перевищує допустиму норму у 1,6 рази, що свідчить про наявність надмірної кількості органічних речовин, які важко окислюються. Інші показники – у межах норми.

Дослідження підтверджують, що води річки Смотрич на більшості ділянок зберігають прийнятний екологічний стан. Водночас виявлене локальне перевищення ХСК у районі с. Цибулівка вказує на потребу проведення додаткових досліджень джерел забруднення.

Висновки. Результати дослідження засвідчують, що води річки Смотрич на більшості досліджених ділянок перебувають у задовільному екологічному стані та можуть вважатися придатними для рекреаційного використання. З метою покращення якості води доцільно розробити та впровадити природоохоронні заходи, зокрема спрямовані на покращення

водообміну, зменшення надходження органічних речовин і стабілізацію гідроекологічного стану річки.

Комплексний підхід до оцінки якості води, який включає просторову диференціацію показників, дозволяє обґрунтувати необхідність систематичного моніторингу стану поверхневих вод для сталого рекреаційного та екосистемного управління басейном річки Смотрич.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати дослідження екологічного стану вод річки Смотрич у межах Національного природного парку «Подільські Товтри» дали змогу визначити рівень забруднення водного середовища та виявити основні екологічні загрози.

Було проведено вимірювання та порівняльний аналіз фізико-хімічних характеристик води, зокрема рівня рН, вмісту розчиненого кисню, біохімічного (БСК) та хімічного споживання кисню (ХСК). Отримані результати дозволяють об'єктивно оцінити якість води та встановити тенденції її зміни під впливом антропогенних чинників.

Результати дослідження мають високу прикладну цінність і можуть бути використані в науковій, природоохоронній та управлінській діяльності. Практичне впровадження заходів, таких як покращення водообміну, розроблення та реалізація програм з охорони та відтворення іхтіофауни, а також запровадження систематичного екологічного моніторингу, сприятиме підвищенню екосистемної стійкості річки Смотрич та забезпеченню сталого природокористування в межах НПП «Подільські Товтри».

Література

1. Національний природний парк «Подільські Товтри». URL: <https://wownature.in.ua/parky-i-zapovidnyky/natsionalnyy-prirodnyy-park-podilski-tovtry/>
2. Гідрологічний огляд річкових систем НПП «Подільські Товтри» URL : <https://www.npptovtry.org.ua/gidrologichnyj-oglyad-richkovyh-system-npp-podilski-tovtry/>
3. Володимир МИСЬКО. Смотрич. URL: <https://www.npptovtry.org.ua/smotrych/>
4. Дорошенко О. Л., Овчарук О. В., Трач С. В., Петрище О. І. Моніторинг якості води річки Смотрич. Матеріали XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство», м. Київ, 2016 р. С. 92-93.
5. Євгеній Пономаренко, Тетяна Дмитренко, Алла Немцова. Оцінка екологічного стану поверхневих водних об'єктів за різними критеріями. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4. 2022.
6. Розроблення методики віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод : Звіт про науководослідну роботу за темою № 5/1.2-21. Харків : НДУ «УНДІЕП», 2021. 171 с.
7. Боярин М. В. Основи гідроекології : теорія й практика [Текст] : навч. посіб. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 365 с.
8. Методика віднесення масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного та хімічного станів масиву поверхневих вод, а також віднесення штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод до одного з класів екологічного потенціалу

- штучного або істотно зміненого масиву поверхневих вод : Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України № 5 від 14.01.2019 р. Офіційний вісник України. 2019. № 16. Ст. 560. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0127-19#Text>
9. Державне агентство водних ресурсів України. Водна стратегія України до 2050 року. Від 9 грудня 2022 р. 1134-р, Київ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>
10. Екологія агросфери : підручник. Фурдичко О. І., Дребот О. І., Дем'янюк О. С., Ткач Є. Д., Бунас А. А. Київ : ДІА, 2022. 336 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ

УДК 504.05:628.4:662.997

ЩОДО ПИТАННЯ ПРО ДРУГИЙ ДОСТАТНІЙ ПОКАЗНИК У МЕТОДОЛОГІЇ МІНІМІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ У ДжЕРЕЛІ ЇХ ВИНИКНЕННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ

Волошин В.С., Бурко В.А.

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»
вул. Дм. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро,
vsvlshn52@gmail.com, burko_v_a@pstu.edu

В роботі надані результати досліджень, що стосуються нових відношень до методології мінімізації промислових відходів в межах самого технологічного процесу. За основу прийнятий принцип термодинамічної двоєдності, як механізм появи промислових відходів в певній низці технологічних процесів і виробничих систем. Останні дослідження показали недостатність умов подолання тільки цього принципу заради досягнення мінімізації більшої частини вихідної сировини з подальшим отриманням максимально можливих об'ємів товарної продукції у межах самого технологічного процесу. Практика показує, що метод надання в технологічний процес нового додаткового джерела енергії, за певних умов її кількості та якості, може призвести як до недосягнення потрібного результату, так і до його перебільшення шляхом введення технологічного процесу у некерований стан. Як результат досліджень для майже 200 технологічних процесів та їх модифікацій, отримані дані, які складають основу положення про те, що другою умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність та одночасна не перебільшеність додаткової зовнішньої енергії E_w^0 заданої якості, для того щоб вивести ту частину сировини, з якої зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан, принаймні, слабкої нерівноважності. Дослідження показали, що, принаймні для семи сучасних виробництв, що розглянуті, існує природний ліміт на можливості введення в технологічний процес додаткової енергії, здатної мінімізувати відходи, що створюються в цьому технологічному процесі. Встановлено чисельне значення коефіцієнта пропорційності, що стосується співвідношення додаткової та базової енергій, наданих до технологічного процесу з метою подолання принципу термодинамічної двоєдності в розмірі $k = E_w^0 / E_0 \leq 0,62$, з похибками до 7,2%. Це поки не обов'язкова величина, яка має бути відміткою для деяких з розглянутих виробництв, але вона є підставою для додаткових та цілеспрямованих експериментальних досліджень в цієї області. *Ключові слова:* промислові відходи, технологічний процес, термодинамічна двоєдність, додаткова енергія, ентропія, енергетичні обмеження.

Additional energy conditions within the principle of thermodynamic duality as a mechanism for creating industrial waste and their minimization in the technological process. Voloshyn V., Burko V.

The paper presents the results of research related to new attitudes to the methodology of minimizing industrial waste within the technological process itself. The principle of thermodynamic duality is taken as a basis as a mechanism for the appearance of industrial waste in a certain number of technological processes and production systems. Recent studies have shown the insufficiency of the condition for overcoming only this principle in order to achieve minimization of most of the raw materials with the subsequent obtaining of the maximum possible volumes of marketable products within the technological process itself. Practice shows that the method of providing a new additional source of energy to the technological process, under certain conditions of its quantity and quality, can lead both to the failure to achieve the desired result and to its exaggeration by introducing the technological process into an uncontrolled state. As a result of research for almost 200 technological processes and their modifications, data have been obtained that form the basis of the provision that the second condition for minimizing wastes inside the source of their occurrence – the technological process, in addition to the state of strong thermodynamic disequilibrium, is the sufficiency and simultaneous non-exaggeration of additional external energy E_w^0 of a given quality, in order to remove that part of the raw material from which the departure from the state of thermodynamic equilibrium usually comes out and transfer it to the initial state, at least of weak disequilibrium. Studies have shown that, for at least seven modern industries, considered, there is a natural limit on the possibility of introducing additional energy into the technological process that can minimize the waste generated in this technological process. A numerical value of the proportionality coefficient has been established, which refers to the ratio of additional and base energy provided to the technological process in order to overcome the principle of thermodynamic duality in size $k = E_w^0 / E_0 \leq 0,62$, with errors of up to 7.2%. This is not yet a mandatory value, which should be a mark for some of the industries under consideration, but it is the basis for additional and purposeful experimental research in this area. *Key words:* industrial waste, technological process, thermodynamic duality, additional energy, entropy, energy constraints.

Постановка проблеми. Потребує аргументів механізм переходу виробничої системи з додатковими джерелами енергії, спрямованими на мінімізацію відходів всередині самої системи, зі стану

стійкості та парної біфуркації і відповідного їй стану термодинамічної нерівноважності в стан біфуркаційної парної множинності і далі до хаосу. У відповідності до такої аргументації, може існувати такий

стан невизначеності системи, який стає саме тим теоретичним обмеженням технологічного процесу, що перешкоджає подоланню принципу термодинамічної подвійності, як причини появи промислових відходів.

Актуальність дослідження пов'язана із фактичним радикальним не вирішенням проблеми мінімізації як накопичених раніше, так і сучасних промислових відходів, зростання яких має майже геометричну прогресію. Існуючі засоби утилізації та переробки більшої частини таких відходів, незважаючи на широку палітру методів та технічних рішень, не в змозі справитися з їх об'ємами. Практика потребує нових, аргументованих підходів щодо цієї проблеми, одними з яких є механізми мінімізації відходів в межах самого технологічного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У дослідженнях накопичено достатній досвід, що ілюструє принцип термодинамічної двоєдності як основи механізмів утворення відходів у технологічних процесах [1, 2, 3]. Показано, що мінімізація відходів у самому джерелі їх виникнення – технологічному процесі залежить, перш за все, від стану термодинамічної нерівноважності компонентів сировини по відношенню до джерела енергії, та самої енергії, що використовується в технологічному процесі. При певних умовах, щодо використання зовнішньої базової енергії E_0 , можна передбачити, що виробнича система здатна переходити не тільки з рівноважного стану в нерівноважний, але й випробує стан невизначеності і навіть хаосу щодо мінливих енергетичних умов технологічного процесу [4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Останні дослідження в галузі мінімізації промислових відходів в межах технологічного процесу, що їх створює, показує на недостатність тільки подолання умови принципу термодинамічної двоєдності, щодо різних компонентів сировинної бази. Свого дослідження чекає проблема якості та кількості додаткової енергії, що спроможна мінімізувати відхідну частину сировини в межах самого технологічного процесу.

Новизна та загальнонаукове значення. В роботі вперше показані кількісні обмеження, що мають існувати відносно додаткової енергії, яка привноситься в технологічний процес для впливу на сировинні компоненти, таким чином, щоб зберегти технологічну цілісність системи. С методичному плані це розширює межі використання метода подолання принципу термодинамічної двоєдності для мінімізації промислових відходів у більшості галузей промисловості.

Викладення основного матеріалу.

Методика дослідження. Для дослідження принципу термодинамічної двоєдності простішим за все має бути посилання на рівняння Л. Онсагера для обчислення зміни ентропії в слабо нерівноваж-

них системах. Для наших цілей рівняння має вигляд $\Delta S / E_0 = r\lambda(1 - \lambda)$, де: $\lambda = \frac{X_0}{X_0 + X_w}$ певний погоджувальний до феноменологічного, коефіцієнт, що визначає співвідношення термодинамічних сил, що беруть участь у виробництві товарної продукції X_0 і в появленні відхода X_w [5]; $r = (J_0 X_0 + J_w X_w^0) / E_0$ – термодинамічний показник, що відображає співвідношення сумарній роботі по перетворенню всієї сировини $((J_0 + J_w) \cdot$ в товарну продукцію, наведеної до базового значення енергії E_0 .

Методика досліджень включала виявлення значень коефіцієнтів r у послідовності технологій, що визначаються величиною ΔS_{max} и $\lambda \approx 0,5$ на феноменологічних кривих Л. Онсагера. Ці точки зазначені в координатах « $\Delta S / E_0 = f(\lambda)$ » для технологічних процесів, що підлягали аналізу, наприклад, як показано в [5], у галузях гірничодобувної, металургійної, машинобудівної, енергетичної промисловості та інших виробництвах. Усього досліджено 90 технологічних процесів та 103 їх модифікації, включаючи експериментальні технології. Вихідними даними для кожного з розглянутих технологічних процесів є статистична звітність підприємств, а також результати літературних досліджень в різних галузях.

Складнощі з приведенням різних технологічних процесів до однакових показників, а також з уніфікацією вихідних даних, згідно зі статистичними звітностями на різних підприємствах, не могли не позначитися на точності одержуваних результатів. Тому в подальших аналізах ми схильні більше зосереджуватися на кількісно-оцінковій, ніж на чисто кількісній стороні результатів. Принаймні там, де статистичні похибки виходять за межі логіки. Статистична обробка результатів дослідження виконана за допомогою *програмного пакету Statistica 6.0. (StatSoft, Inc., США)*.

Враховуючи неоднозначність та розрізненість однойменних показників в незалежних вибірках показників для різних виробничих систем, достовірність в умовах відсутності нормального розподілу оцінювалась за допомогою непараметричного U – критерія Манна-Уїтні [6] у вигляді єдиної вибірки для порівнюваних залежностей $U_1 = R_1 - 0,5n_1(1 + n_1) \leftrightarrow U_2 = R_2 - 0,5n_2(1 + n_2)$, таким чином, що тільки $U_{1,2} = \min$ показує на їх непорівнянність. Тут: $R_{1,2}$ – сума рангів для відповідної вибірки; $n_{1,2}$ – розмір кожної з вибірок.

Підсумки дослідження залежності типу $\frac{\Delta S}{E_0} = f(r)$ я різних технологій систематизовані по даним роботи авторів [7] та представлені на рис. 1 у вигляді окремих точок початкових значень зміни ентропії (у вигляді відповідних U -критерію Манна-Уїтні і середньоквадратичної похибки $\pm \sigma_{\Delta S}$ її математичного очікування $M_{\Delta S}$). З урахуванням похибок, отриманих при обробці експериментальних даних (в залежності від потужності, типу технічної сис-

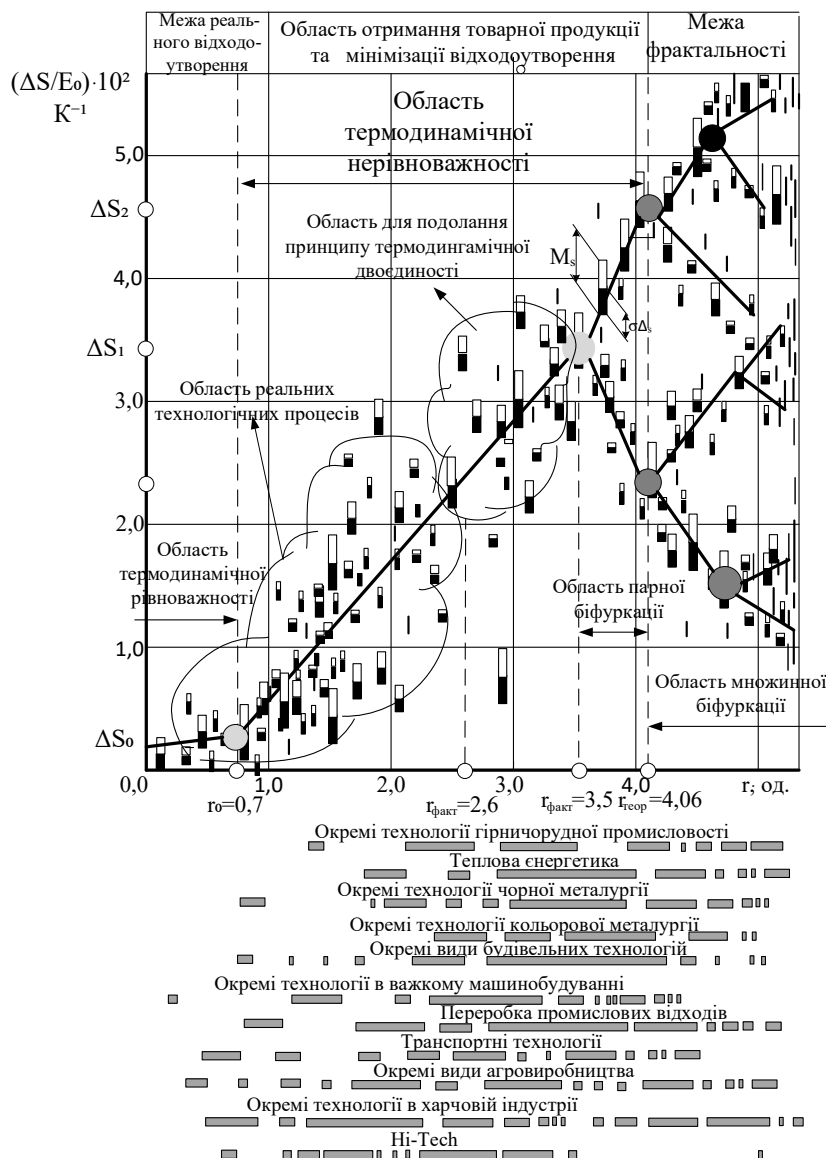


Рис. 1. Розрахункові дані для оцінки межі термодинамічної нерівноважності та хаосу для різних технологічних процесів. (Окремо виділена область для реальних технологічних процесів та область гіпотетичних розрахункових даних)

теми, її продуктивності, якості сировини і кількості кінцевих відходів виробництва), цифри на графіку в області подвоєння результатів можуть бути приблизно порівнянні з закономірностями, викладеними в роботі [8].

У переважній більшості технологій, які підлягали аналізу, присутня базова або модифікована *теплова* енергія, з дуже малою тепловою ефективністю і високою ентропією процесу. Не більш як у 14% досліджуваних технологічних процесах використовується *електрична* енергія, але тільки 5% з них, це чисто електричні та електролітичні процеси, а решта – їх електротермічні модифікації, ККД яких також вкрай низький при високих значеннях ентропії. Трохи більше 15% від загальної вибірки технологічних процесів пов'язані з використанням інших

типових видів енергії (механічної, пневматичної та гідравлічної та ін.).

Для мети цієї роботи важливими є деякі інтервали, в яких відображається відношення параметрів системи до стану термодинамічної рівноваги. Вони досить чітко відрізняють чотири акцентні області (див. рис. 1).

1. За умовою, коли $r \leq 3,5$ цікаві розрахунки де $J_w X_w^0 \sim 0,62 E_0$. Для такого співвідношення певної роботи з кількістю додаткової енергії має статися реальний вплив термодинамічних сил X_w^0 , що реалізуються в сильно нерівноважній системі, до перетворення матеріального потоку J_w у напрямку його суттєво інших якостей наприклад, споживчої цінності. Підкреслимо гіпотетичний характер цієї залежності.

2. В той же час, при первинній недостатності додаткової зовнішньої енергії, за умовою $J_w \cdot X_w^0 < 0,62 E_0$ відбувається перехід системи до періодичної поведінки щодо параметра r .

Зокрема, при дотриманні умови термодинамічної нерівноважності в системі, наприклад, при $r > 3,5$ коли існують розрахункові $J_w \cdot X_w^0 \leq 0,56 E_0$, вона може стати об'єктом парної біфуркації, тобто первинної невизначеності, а при $r \approx 4,06$ – виявляти ознаки вже множинності парних біфуркацій і навіть хаотичного стану, тобто сильної невизначеності, яка ставить під сумнів можливість енергетичного впливу як на J_w , так і на J_0 . У такому разі біфуркаційне множення періодів робить виробничу систему з додатковою, але недостатньою, зовнішньою енергією E_w енергетично некерованою в найближчому діапазоні зміни термодинамічного параметра r .

З викладеного слідує висновок у тому, що умовою мінімізації відходів усередині джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності [3], є *достатність* та одночасна *не перебільшеність* додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, для того щоб вивести ту частину сировини, з якої

зазвичай виходить відхід зі стану термодинамічної рівноваги та перевести її у вихідний стан слабкої нерівноважності.

Виявлення чисельного значення коефіцієнта пропорційності між базовою та додатковою (модифікованою) енергіями (k). Зіставимо вказані вище дослідження з прикладними результатами для існуючих технологій у галузі одного з найбільш забруднюючих виробництв – металургійного. Наука та практика накопичила достатній досвід у технологіях виробництва сталі, одного з найтехнологічніших матеріалів сучасності. Всього в історії сталеплавильного виробництва було створено кілька десятків технологічних процесів [9, 10]. Основні з таких (табл. 1), що знайшли практичне застосування, прийняті до уваги у цих дослідженнях (рис. 2), що виконані за методикою, визначеною вище.

Кожен з цих технологічних процесів пов'язаний з джерелами енергії різної потужності і якості, кожен має свій певний асортимент відходів. І одно з головних завдань, яке в них вирішується, полягає в отриманні максимальної кількості якісної товарної продукції. А ми потребуємо водночас ще й ретельно мінімізувати відходи в самому технологічному про-

Таблиця 1

Загальна характеристика деяких технологічних процесів отримання сталі та її відходів, зведених до одиниці товарної продукції.

№№ п/п	Найменування технології	Короткий опис технологічного процесу та його відходи	Кількість відходів, т/т
Технології прямого напрямку			
I	Томасівський процес	Він полягає в продуванні розплавленого чавуну повітрям через дно конвертера, який видаляє домішки, такі як фосфор. Метод був економічним і підходив для переробки залізної руди з високим вмістом фосфору. Відходи: шлак, пил, металобрухт	0,3–0,5
II	Бессемерівський процес	Передбачає продування збагаченого повітря через розплавлений чавун в конвертері. Процес дуже швидкий, але чутливий до складу металу, що подається, зокрема вмісту фосфору та сірки. Відходи: шлак, пил	0,15–0,3
III	Мартенівський процес	Заснований на нагріванні рідкого чавуну і металобрухту у великому агрегаті регенеративної мартенівської печі. Перевагами методу є можливість використання різних видів сировини і ретельний контроль хімічного складу сталі. Відходи: шлак, пила, металобрухт, шлам	0,2–0,4
IV	Киснево-конвертерний процес	Заснований на продуванні рідкого заліза чистим киснем, що забезпечує більш швидке і ефективне видалення домішок. Технологія є однією з найпоширеніших у сучасному сталеплавильному виробництві завдяки своїй енергоефективності. Відходи: шлак, пила, окалина	0,1–0,2
V	Технологія прямого відновлення заліза	Відновлення залізної руди до стану залізного напівфабрикату в твердому стані з використанням природного газу або вугілля при температурі 800–1200°C. Залізо може використовуватися в електродних печах для виробництва сталі. Відходи: металічна окалина, пил, залишки вуглецевих матеріалів.	0,05–0,15
VI	Електросталеплавильний процес	Використовується електрична енергія для розплаву металічного брухту та залізрудних матеріалів. Метод надає високу якість сталі та широко використовується для спеціальних сталей. Відходи: шлак, пил, відпрацьована цегла, металічний брухт	0,1–0,25

цесі. Про це вимагає, як мінімум, динаміка втрат від утворення відходів за кожною технологією в міру її енергетичного насичення і коливання специфіки сировини. Причому кількість відходів, що виносяться на одиницю одержуваного товарного продукту, в залежності від кількості і якості базової зовнішньої енергії E_0 , специфіки самого технологічного процесу (умов фізико-хімічних реакцій) дає умовну лінію зміни наведеної ентропії $\Delta S/E_0$ в залежності від заданих значень термодинамічних коефіцієнтів r і λ і поведінки самої системи (див. рис. 2). а саме, від співвідношення E_w/E_0 .

По-перше, відмітимо, що зсув вправо від стандартного значення кожної величини в цих відносностях складає, наприклад, $7,3:4,5=1,62$ частки від сумарної енергії, що технологічний процес спроможний поглинути, без перекидання в хаотичний стан. Або $4,79:2,95=1,62$ – частки від зміни ентропії системи приведеної до базової енергії системи, що вказує на незмінність внутрішньої енергії особисто технологічного процесу в межах такої енергетичної інтервенції. З цього виходить існування класичного співвідношення

$$E_0 + E_w \rightarrow 1,62E_0 \text{ або } E_w \sim kE_0, \text{ де } k=0,62,$$

кількісне значення якого дійсне, принаймні, для металургійних технологій.

Два показника, що впливають на мінімізацію відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі, це термодинамічна нерівноважність, як залежність від запропонованого термодинамічного показника r , і енергетична насиченість технологічного процесу, що забезпечує переробку не тільки основного потоку сировини J_0 в корисні продукти, але і тієї частини сировини J_w , яка в звичайній системі відправляється у відходи, тобто залежність від коефіцієнта λ . Для цього на графіках (див. рис. 2) показана крива зміни ентропії, що приведена до

базової енергії системи E_0 . Її аналіз дає уявлення про існування (чи ні) суттєвого резерву для мінімізації відходів у таких технологічних процесах, наближаючи їх до теоретично обґрунтованого рівня.

Наприклад, додаткова енергія ΔE_w для відходуотворюючого мартенівського процесу (точки «а») зі співвідношенням параметрів r_a в межах $5,5:1,8=3,05 \gg 1,62$ у порівнянні з класичною технологією, виводячи його умовну сумісну роботу $(J_0X_0 + J_wX_w^0)$ за межі спроможності самого технологічного процесу $(E_0 + E_w) \gg 1,62$ від базової енергії, чим здатна привести систему в явно не стійкий і, навіть, хаотичний стан, в якому немає бути специфічної термодинамічної нерівноважності. І, водночас, технології прямого відновлення заліза та електродугового переплаву (див. точки «b» і «c») відповідно) дають співвідношення параметрів r_b ($3,14:1,9=1,65$) та r_c ($2,5:1,56=1,60$), відповідно, тобто вказують на досяжність стійкості системи та стану термодинамічної нерівноважності в таких технологіях при підведенні до них енергії іншої якості з розрахунку $E_w \sim 0,62E_0$. У другому та третьому випадках системи не переходять в стан множинних біфуркацій і подальшого хаосу, який перешкоджає якісному впливу на потенційну відходуотворюючу сировину (див. рис. 2).

Аналогічні викладки зробимо для низки інших технологічних процесів, для яких мають бути в доступі певні статистичні матеріали (табл. 2). Їх результати мають бути підтвердженням тому, що в традиційному технологічному процесі існують приховані резерви для того, щоб процес був термодинамічно спрямований не тільки на отримання товарної продукції, але й на дії, щодо мінімізації відходів, які є невід'ємною частиною як сировинної бази так і енергетики цього процесу, шляхом цілеспрямованої їх переробки на користь того, хто цей процес упорядкував.

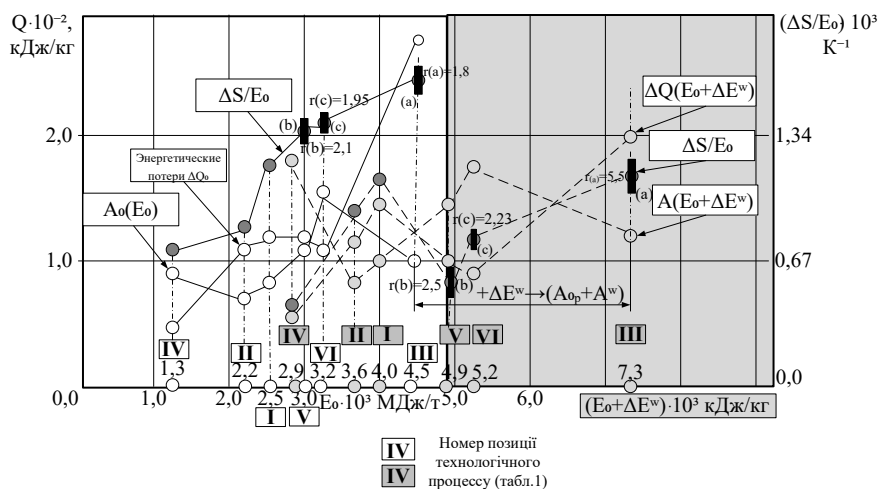


Рис. 2. Енергоентропійні залежності для визначення області термодинамічної нерівноважності як показника досяжності мінімального утворення відходів у технологіях виробництва сталі

Таблиця 2

Деякі статистичні дані, що вірують до оцінки енергетичних додатків у технологічному процесі, що забезпечують досягнення теоретично допустимого мінімуму утворення відходів

Назва технологічного процесу	Значення енергії в системі, кДж/кг сировини		Розрахункове значення коефіцієнта r на межі стійкості системи	Зсув вправо у значеннях певної енергії в системі, k	Похибка у розрахунку значення k $\delta = \frac{1}{k_0} \sum \Delta k_i$
	Базова*, E_0	Додаткова (модифікована)* $E_w (E_0^w)$			
Виробництво Хліба	2000 ÷ 2300	1210 ÷ 1350	0,94 ÷ 1,12	0,60 ÷ 0,63	0,048
Виробництво цементу	2940 ÷ 3250	1700 ÷ 2000	0,98 ÷ 2,11	0,58 ÷ 0,615	0,072
Легування металів	1360 ÷ 1450	850 ÷ 900	1,52 ÷ 1,77	0,629 ÷ 0,642	0,051
Вилугування міді	810 ÷ 1910	510 ÷ 1240	0,88 ÷ 3,6	0,629 ÷ 0,649	0,061
Технологія сироваріння	430 ÷ 650	275 ÷ 390	0,52 ÷ 0,90	0,60 ÷ 0,639	0,062
Штампувальні технології	1440 ÷ 1950	900 ÷ 1200	1,77 ÷ 2,21	0,625 ÷ 0,615	0,016
Плавлення скла	4200 ÷ 4500	2550 ÷ 2800	1,32 ÷ 1,41	0,607 ÷ 0,622	0,024

* – зовнішня енергія для поточного технологічного процесу може змінюватися з урахуванням специфіки на різних підприємствах.

Якщо враховувати похибки, що мали місце в результаті збору статистичної звітності по різних технологіям з доступних джерел, то відхилення в 1,6 ÷ 7,2 % від середнього значення величини $k_0 = 0,62$ можна визначити, як допустиме для того, щоб встановити опосередковане значення цієї величини.

Співвідношення потрібної додаткової та базової енергій в системі у розмірі $\sim 0,62$, як збіг обставин, дуже близьке до так званого «Золотого перетину» – 0,618, відомого, як основа краси та гармонії в багатьох природних та антропогенних явищах. Залишимо цей факт як цікаве, але недоказане співпадіння [11]. Але, принаймні, розрахункові значення вищенаведеного коефіцієнта, близького до числа 0,618, як умова мінімізації утворення відходів у джерелі утворення відходів – технологічному процесі, можуть свідчити про наближення до ідеального кінцевого технологічного процесу і потребують додаткових досліджень. Існування числа $k \approx 0,62$ в технологічних процесах безумовно не означає відповідності таких систем до області широко відомого числа Фібоначчі. Тим не менш, це може означати лише те, що будь-яка виробнича система в якій певним чином синхронізовані матеріальні (початково, природні) та енергетичні потоки таким чином, що між ними виконується термодинамічне узгодження, є системою, яка максимально

наближена до самоорганізації, та здібна до оптимізації певних параметрів, зокрема, сировини, що отримана з Природи, та відходу, що відторгнується людиною назад до Природи.

Подібний аналіз легко здійснити і для інших технологічних процесів, вказавши конкретні енергетичні параметри з подальшим розрахунком наведеної ентропії та визначення термодинамічного коефіцієнта, заради співвідношення $k = E_w / E_0$. Результати можуть знайти застосування при прогнозуванні розвитку, сучасних технологій, а також як подальше дослідження.

Головні висновки та перспективи використання результатів дослідження.

1. Другою умовою мінімізації відходів в межах джерела їх виникнення – технологічному процесі, крім стану сильної термодинамічної нерівноважності, є достатність додаткової зовнішньої енергії E_w заданої якості, яка здатна впливати на ту частину сировини, яка в поточних умовах створює відхід.

2. Встановлено чисельне значення коефіцієнта пропорційності, що стосується співвідношення додаткової та базової енергій, наданих до технологічного процесу в деяких промислових галузях, з метою подолання принципу термодинамічної двоєдності в розмірі $k = E_w / E_0 \leq 0,62$, з похибками до 7,2%. Для інших технологічних процесів такі значення потребують додаткових досліджень.

Література

1. Волошин В. С., Данилова Т. Г., Мнацаканян М. Г. Принцип мінімізації відходів у джерелі походження як новий підхід до сучасних технологічних устроїв. Вісник Кременчугського національного університету ім. М. Остроградського. Кременчук, 2023. Вип. 4(141). С. 42-48.
2. Волошин В. С., Слістратова Н. Ю. Термодинаміка утворення відходів та стратегія розвитку сучасних енергетичних технологій. V Міжнародн. науково-практичної конференції «Безпека енергетики в епоху цифрової трансформації», Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України Академперіодика, Київ, 2023. С. 139 – 142.
3. Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення -технологічному процесі. Екологічні науки. № 2 (53). 2024. С. 114-122.
4. Волошин В. С. Властивості суміжного хаосу для виробничих відходоутворюючих систем. Вісник ПДТУ Технічні науки. 2021. Вип. 43 С. 74-80.
5. Волошин В. С. Відходи та термодинаміка. Київ-Маріуполь, СПД Самченко, 2024. 80.с.
6. Mann, H. B., Whitney, D. R. (). On a Test of Whether One of Two Random Variables Is Stochastically Larger Than the Other. *Annals of Mathematical Statistics*, № 18(1), 1947. P. 50–60.
7. Волошин В. С., Бурко В. А. Щодо питання про досяжність теоретичного мінімуму утворення відходів як фізичного явища в технологічних процесах. Математика, інформатика, фізика: наука та освіта. Т. 2, № 1 2025. С. 156-171.
8. May, R. M. Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261(5560), P. 459-467.
9. World Steel in Figures 2023. World Steel Association. Brussels. 2023. 36 p.
10. The Global Steel Industry in Figures. OECD Publishing. Paris. 2022. – 72 p.
11. 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: 09.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

СУЧАСНІ ВЕРМІКОПОСТЕРИ ЇХНІ ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

Гетта А.А., Ковров О.С.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

пр. Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро

nastya.getta18@gmail.com, kovrov.o.s@nmu.one

У роботі розглядається вермікомпостування як ефективна біотехнологія переробки органічних відходів за участю дощових черв'яків і супутньої мікрофлори. Проаналізовано екологічні та агрономічні переваги цього процесу, зокрема зменшення навантаження на полігони та виробництво цінного органічного добрива – біогумусу. Основна увага приділена сучасним типам компостерів, які використовуються у вермікультури. Описано особливості основних систем вермікомпостування, їхню конструкцію, принцип дії, переваги та недоліки.

В статті приведений контейнерний метод, що базується на шаровому укладанні субстрату в герметичних або напіввідкритих ємностях і міграції черв'яків між контейнерами для отримання готового біогумусу. Розглянуті траншейні та валкові системи, у яких органічні матеріали викладають у великих траншеях або довгих валках, періодично поливають і перевертають або доповнюють свіжим субстратом, стимулюючи поступове переміщення черв'яків і багатшарове розкладання. Наведені промислові барабанні компостери (роторні обертові барабани) – закриті циліндричні ємності з механізмами змішування та аерації, що працюють як періодичні або безперервні лінії, дозволяючи інтенсивно обробляти великі обсяги відходів із точним контролем температури та повітря. Приведені також вертикальні лоткові системи, де субстрат завантажується тонкими шарами на сітчасте дно, а готовий компост збирається знизу за допомогою скребоків або стягуючих планок, що забезпечує мінімальне втручання і високу чистоту кінцевого продукту. Також розглянуті (Системи безперервної дії) (Continuous Flow–Through, CFT) які базуються на єдиному принципі безперервного потоку субстрату, що забезпечує оптимальні умови для життєдіяльності дощових черв'яків і пов'язаних із ними мікробіологічних спільнот.

Розроблені авторами наведені в якості експериментальних конвеєрні вермікомпостери, які організують постійний потік субстрату зверху вниз або по рухомій стрічці, автоматизуючи надходження корму та збір біогумусу й вермічаю без порушення стабільності біоценозу.

В загальному у роботі проаналізовано основні недоліки сучасних систем вермікомпостування, незважаючи на їхню загальноновизнану ефективність. Зокрема, розглянуто такі обмеження, як високі початкові витрати на комерційні компостери, чутливість дощових черв'яків до змін навколишнього середовища, ризики виникнення шкідників та анаеробних умов при неправильному управлінні, а також обмеження за обсягом переробки органічних відходів.

Зазначено, що ефективність вермікомпостування значною мірою залежить від відповідності обраної системи конкретним умовам експлуатації та рівня підготовленості користувача до дотримання технологічних вимог.

Метою дослідження є оцінка ефективності різних компостерів з огляду на їхню зручність, продуктивність та придатність для використання в умовах різного масштабу. *Ключові слова:* вермікультивування, каліфорнійський черв'як *Eisenia fetida*, роторно-барабанні системи, системи безперервної дії, конвеєрні системи.

Modern vermicomposters, their advantages and disadvantages Hetta A., Kovrov O.

The paper considers vermicomposting as an effective biotechnology for processing organic waste with the participation of earthworms and associated microflora. The environmental and agronomic advantages of this process are analyzed, in particular, reducing the load on landfills and producing valuable organic fertilizer – vermicompost. The main attention is paid to modern types of composters used in vermiculture. The features of the main vermicomposting systems, their design, principle of operation, advantages and disadvantages are described.

The article presents a container method based on layered substrate laying in sealed or semi-open containers and worm migration between containers to obtain ready-made biohumus. Trench and roller systems are considered, in which organic materials are laid out in large trenches or long rollers, periodically watered and turned over or supplemented with fresh substrate, stimulating the gradual movement of worms and multi-layer decomposition. Industrial drum composters (rotary rotating drums) are enclosed cylindrical containers with mixing and aeration mechanisms that operate as batch or continuous lines, allowing for intensive processing of large volumes of waste with precise temperature and air control. Vertical tray systems are also presented, where the substrate is loaded in thin layers onto a mesh bottom, and the finished compost is collected from below using scrapers or rupture barriers, which ensures minimal intervention and high purity of the final product. Also considered are (Continuous Flow–Through, CFT) systems, which are based on the single principle of continuous substrate flow, which provides optimal conditions for the life of earthworms and their associated microbial communities.

The authors developed conveyor vermicomposters, which organize a constant flow of substrate from top to bottom or along a moving belt, automating the supply of feed and the collection of vermicompost and vermi-chay without disrupting the stability of the biocenosis, are presented as experimental conveyor vermicomposters.

In general, the paper analyzes the main shortcomings of modern vermicomposting systems, despite their generally recognized effectiveness. In particular, such limitations as high initial costs for commercial composters, the sensitivity of earthworms to environmental changes, the risks of pests and anaerobic conditions with improper management, as well as limitations in the volume of organic waste processing are considered.

It is noted that the effectiveness of vermicomposting largely depends on the compliance of the selected system with specific operating conditions and the level of user preparedness to comply with technological requirements.

The purpose of the study is to assess the effectiveness of various composters in terms of their convenience, productivity, and suitability for use in conditions of different scales. *Key words:* vermiculture, California worm *Eisenia fetida*, rotary drum systems, continuous systems, conveyor systems.

Постановка проблеми. Попри високу ефективність вермікомпостування як біотехнології переробки органічних відходів та його екологічні й агрономічні переваги, зокрема зменшення навантаження на полігони та виробництво цінного добрива, залишаються невирішеними низка практичних питань, пов'язаних із вибором і використанням компостерів [1]. Додатковими обмеженнями є високі початкові витрати, необхідність дотримання вузького діапазону екологічних параметрів, ризик розвитку шкідників, утворення анаеробних зон та обмежена продуктивність малогабаритних установок. Це створює потребу в систематизованій оцінці існуючих типів компостерів із позицій їхньої адаптивності до різних умов експлуатації, що й обумовлює актуальність даного дослідження [2].

Актуальність дослідження. У сучасних умовах зростаючого навантаження на навколишнє середовище та необхідності ефективного управління органічними відходами вермікультивування набуває особливої значущості як екологічно чиста та економічно доцільна біотехнологія [3]. Ефективність впровадження вермікомпостування значною мірою залежить від правильного вибору обладнання та розуміння біологічних особливостей дощових черв'яків, зокрема їхньої здатності до зростання, розмноження та переробки органіки. У зв'язку з цим актуальним є вивчення сучасних типів компостерів, їхніх конструктивних рішень, переваг і обмежень у практичному застосуванні [4]. Таким чином, дослідження спрямоване на вдосконалення практик вермікультивування є своєчасним і важливим з точки зору екологічної безпеки, аграрної ефективності та розвитку циркулярної економіки.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Безперервна подача відходів і одночасний збір компосту дозволяють інтегрувати конвеєрні системи в модель циркулярної економіки, у якій органічні залишки перетворюються на цінний продукт без накопичення біоресурсів на сміттєзвалищах. Це відповідає глобальним екологічним завданням скорочення викидів парникових газів та мінімізації площ під полігонами.

Компактний розмір конвеєрних вермікомпостерів дозволяє інтегрувати потужні установки навіть у обмежені міські приміщення або малогабаритні фермерські двори, що відповідає потребі децентралізованої переробки відходів у передмісті та міських громадах. Пропоновані конвеєрні вермікомпостери надають можливість створення методів дешевої переробки відходів для сільської місцевості та урбанізованих районів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У сучасній науковій та прикладній літературі дедалі більше уваги приділяється вдосконаленню технологій вермікомпостування як ефективної економіки та сталого сільського господарства. В нашій лабораторії дослідження останніх років зосереджені на розробці та оптимізації конструкцій вермікомпостерів, що дозволяють підвищити ефективність переробки органічних відходів, покращити ергономіку експлуатації та зменшити вплив людського фактору.

У багатьох наукових працях аналізуються конструкційні особливості багатоярусних вермікомпостерів, що дозволяють автоматизувати процес відокремлення компосту від черв'яків і збирати вермічай – рідкий добривний продукт [5]. Водночас, дослідники наголошують на ризиках перевантаження таких систем органікою, що може призводити до утворення анаеробних зон та погіршення умов для життєдіяльності черв'яків [6].

Актуальним є також питання енергоефективності та застосування перероблених матеріалів у виготовленні вермікомпостерів [7]. Інженерні підходи спрямовані на створення мобільних і модульних систем, адаптованих до умов міського середовища. Дослідження в цій сфері демонструють ефективність простих контейнерних систем для побутового використання, водночас підкреслюючи обмеження за обсягом переробки [8].

Науковці підкреслюють, що ефективність вермікомпостерів значною мірою залежить не лише від конструкції, а й від обізнаності користувачів у дотриманні температурного режиму, вологості, аерації та раціону черв'яків. Це вказує на необхідність поєднання технічного вдосконалення з інформаційною підтримкою для кінцевого споживача [9].

Таким чином, в сучасних дослідженнях простежується тенденція до інтеграції екологічної доцільності, технологічної ефективності та економічної доступності при створенні вермікомпостерів, але водночас залишаються актуальними питання стандартизації, масштабування та адаптації до різних умов експлуатації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У межах дослідження виявлено кілька аспектів конвеєрних вермікомпостерів, які досі залишаються недостатньо вивченими або практично не вирішеними:

Існуючі рішення щодо інтеграції датчиків вологості, температури та вентиляції не мають єдиної методики калібрування й адаптації до швидкозмін

у товщині біошару, що може призводити до локальних стресів у популяції черв'яків.

Недостатньо описані зміни рівня стресу, репродуктивного потенціалу та життєдіяльності *Eisenia fetida* в умовах безперервного руху тонкошарового середовища з різними швидкостями конвеєра.

Відсутні узагальнені моделі повернення інвестицій з урахуванням вартості обладнання, електроенергії, технічного обслуговування та екологічної вигоди від зменшення органічних відходів.

Новизна. Поєднання схеми безперервного тонкошарового руху субстрату з багаторівневою конструкцією дозволяє суттєво підвищити продуктивність на одиницю площі й одночасно зберегти рівномірність живлення та середовища для черв'яків.

Запропоновано метод кількісного підбору кута похилу стрічок і рівномірного розподілу біомаси з урахуванням статичних та динамічних параметрів руху, що дозволяє мінімізувати енергозатрати на переміщення стрічок під навантаженням.

Поєднання різних механізмів відділення – самопротруска, тонкосітчастий барабан, рухомі піддони – створює гнучкий «комплект» збору готового вермікасту під конкретні виробничі потреби.

Запропоновано комплексну модель оцінки доцільності впровадження конвеєрних вермікопостерів, що враховує капітальні й експлуатаційні витрати, енергоспоживання, трудовитрати та екологічну вигоду від зменшення викидів метану на полігонах.

Методологічне та загальнонаукове значення.

Вбудовані системи аерації, зволоження та датчики забезпечують постійний моніторинг ключових параметрів середовища, що сприяє глибшому розумінню оптимальних діапазонів температури, вологості та концентрації кисню для різних видів дощових черв'яків і супутніх мікроорганізмів. Модульна конструкція конвеєрних систем дає змогу змінювати об'єми й швидкість подачі субстрату, що полегшує вивчення кінетики біоокиснювальних процесів у умовах, наближених до промислових, та адаптувати результати лабораторних досліджень до практичних застосувань.

Виклад основного матеріалу. У роботі розглянемо сучасні методи вермікопостування і перший із них – контейнерний метод. Контейнерний метод вирощування компостних черв'яків базується на штучному складанні живильного субстрату в герметичних або напіввідкритих ємностях та забезпеченні оптимальних умов для життєдіяльності черв'яків у обмеженому просторі. Зазвичай субстрат (ферментований гній, рослинні відходи, садові листя) укладають у контейнери, після чого в нього заселяють маточну культуру компостних черв'яків (найчастіше каліфорнійський черв'як *Eisenia fetida*). Контейнери можна розміщувати на вулиці (в тіні) або в закритих приміщеннях, а за потреби переставляти у теплі приміщення на зиму [10-11]. Після того, як верхні

шари субстрату будуть перероблені, до використаної ємності підставляють новий контейнер із свіжим кормом – і черв'яки мігрують до нового живильного середовища, залишаючи за собою готовий біогумус.

Контейнерні системи забезпечують кращий контроль над середовищем вермікопостування порівняно з відкритими системами. Це полегшує підтримку оптимальних рівнів температури, вологості та рН, особливо при розміщенні в приміщенні. Таке контрольоване середовище мінімізує вплив зовнішніх факторів, таких як несприятливі погодні умови, та допомагає відлякувати шкідників.

Особливо для компактних та вертикальних конструкцій, контейнерні системи є дуже компактними. Вони добре підходять для міського середовища, квартир, гаражів, підвалів або невеликих комерційних операцій, де площа обмежена.

При належному управлінні та достатній аерації, контейнерні баки виробляють мінімальні, земляні запахи, що є значною перевагою перед анаеробними методами розкладання. Постійна аерація запобігає появі неприємних запахів, що робить їх придатними для використання в приміщенні.

Багато контейнерних систем розроблені з вбудованими дренажними механізмами, що дозволяють збирати багату на поживні речовини рідину, яку часто називають вермічай рис. 1. Ця рідина є цінним продуктом, який можна використовувати як потужне рідке добриво для рослин.

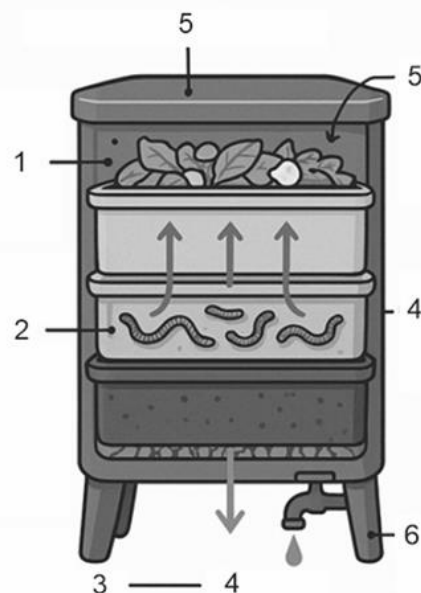


Рис. 1. Контейнерні системи

На рис. 1 зображені контейнерні системи де: 1 – верхній лоток – свіже органічне сміття. Сюди додають нові харчові відходи (овочеві шкідники, чай, кавова гуща тощо). Черв'яки поступово мігрують сюди з нижніх шарів у пошуках їжі. 2 – середній лоток – активна зона. Тут відбувається основна переробка:

черв'яки активно розкладають органіку. Матеріал частково розкладений, вологий і насичений мікроорганізмами. 3 – нижній лоток – готовий вермікомпост. Темна, пухка маса – це кінцевий продукт, багатий на гумус. Його можна зібрати вручну або пересипати через сито. 4 – дренажний шар з краном. Збирає надлишкову вологу (вермічай), яку можна використовувати як рідке добриво. Кран дозволяє зливати рідину без розбирання конструкції. 5 – вентиляційні отвори. Забезпечують доступ кисню. Запобігають утворенню неприємного запаху та анаеробних умов.

Стрілки міграції черв'яків і рідини показують: ▲ Черв'яки рухаються вгору до нової їжі, ▼ Волога стікає вниз до дренажного шару.

Переваги контейнерних систем складається з компактних розмірів, легкості, портативності, можливість використання цілий рік [12].

Але є і певні недоліки менші контейнерні системи мають обмежену здатність переробляти великі обсяги органічних відходів і черв'яки залишаються чутливими до екстремальних температур та заводяться шкідники при перезволоженні субстрату [13].

Траншейні та Валкові Методи (Trench and Windrow Methods). Траншейні та валкові методи вермікомпостування ґрунтуються на створенні статичного багатошарового середовища, в якому органічний субстрат укладається у довгі ряди (валки) або траншеї фіксованих розмірів і переробляється дощовими черв'яками та їхньою супутньою мікрофлорою у біогумус. У класичних траншейних системах субстрат із коров'ячого гною або інших агропромислових відходів попередньо витримують у компостері протягом 7–10 днів, після чого поміщають у цегляні або земляні траншеї розмірами приблизно $1,25 \times 0,75 \times 4,0$ м. Для підтримання оптимальної аерації та вологості його періодично перевертають і звожують.

На рис. 2а зображена траншейна система де: 1 – вкриваючий шар мульчею. 2 – бокова стінка. 3 – органічний субстрат.

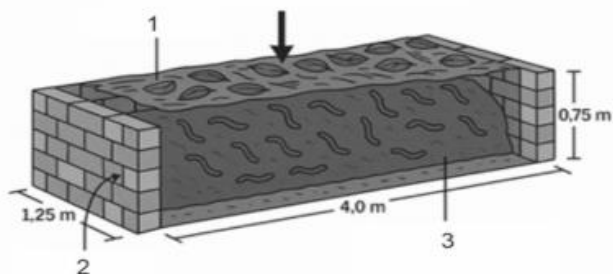


Рис. 2а. Траншейна система

Валкові системи, передбачають формування куп довжиною декілька метрів, висотою та шириною близько 90 см, які заселяють черв'яками. Свіжий субстрат додають до одного кінця валка, стимулюючи поступову міграцію черв'яків у напрямку

нової органіки. Обидві конфігурації часто накривають листям для збереження тіні та запобігання перегріву [14].

На рис. 2б зображена валкова система де: 1 – вкриваючий шар мульчею; 2 – свіжий субстрат; 3 – рух черв'яків.

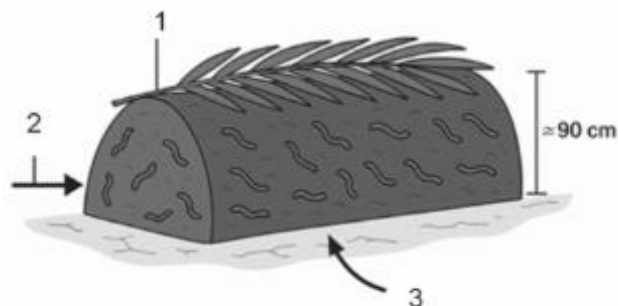


Рис. 2б. Валкова система

Переваги траншейних і валкових методів не потребують складних пристроїв чи автоматизації, можна легко збільшити обсяги обробки продовживши довжину валків або розширивши кількість траншей, відсутність дорогого каркасу чи механізмів, багатошарове укладання багатих на вуглець і на азот матеріалів створює достатню вентиляцію [15].

Недоліки траншейних, валкових методів полягають в регулярному перевертанні, поливі і доповненні субстрату потребують значних трудових витрат. Оптимальні параметри – вологість 40–45 %, температура 25–28 °C, рН 6,5–7,0; їхнє недотримання призводить до стресу черв'яків і зниження продуктивності.

Роторно-барабанні системи. Їхня конструкція включає механічні компоненти для змішування, перемішування та аерації, часто з системами примусової подачі повітря для контролю рівня кисню та температури. Системи можуть бути безперервної подачі, де матеріал додається з одного кінця і вивантажується з іншого, або періодичної дії [16]

На рис. 3 зображені роторно-барабанні системи де: 1 – вхідний патрубок; 2 – примусова аерація; 3 – примусова аерація; 4 – сталевий каркас 5 – примусова аерація 6 – опорні валики; 7 – вихідний патрубок; 8 – барабан; 9 – змішувальний вал.

Переваги барабанних систем полягають в автоматичному перемішуванні та аерації субстрату, можливості безперервного завантаження органіки, інтенсивність контакту обертового барабану з повітрям.

Недоліками барабанних систем є значні капітальні вкладення, енергоспоживання, ризик перегріву, механічний знос.

Вертикальні (лоткові) системи. Вертикальні системи вермікомпостування зазвичай відносяться до «проточних» або «піднятих грядок». Ці системи характеризуються наявністю шару органічного матеріалу (часто глибиною 20 дюймів або більше) з сіт-

частим дном в основі. Сировина додається тонкими шарами (наприклад, 1 дюйм) на верхню поверхню. Збір біогумусу відбувається знизу шляхом переміщення стягуючої планки або скребка по сітчастому дну, що змушує готовий вермікаст падати в зону збору внизу [17]. На рис. 4 зображені вертикальна-вермікомпостерна система де: 1 – тонкий шар субстрату; 2 – органічний шар матеріалу; 3 – вермікаст 4 – сітчастий екран, 5 – стягуюча планка

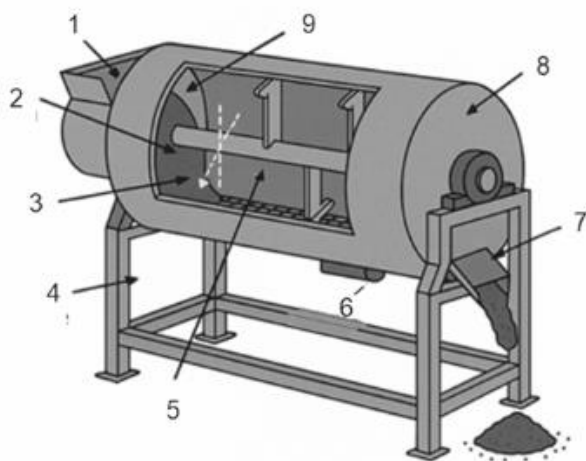


Рис. 3. Промисловий роторно-барабанний компостер

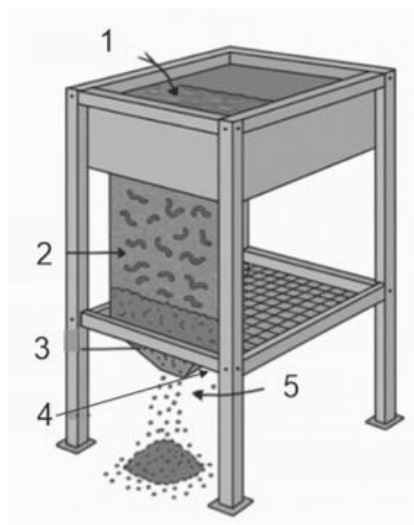


Рис. 4. Вертикальна-вермікомпостерна система

Переваги лоткових систем полягає в компактності конструкції, природна міграція черв'яків вгору сприя самовивантаження, можливість розділення фаз переміщення черв'яків.

Є і недоліки лоткових систем в обмеженні об'єму кожного лотка, необхідність ручної або механізованої заміни лотків і подачі корму зверху, надмірна вологість перешкоджає міграції черв'яків.

Системи безперервної дії (Continuous Flow Through – CFT) Сучасні промислові та напівпромислові вермікомпостувальні системи, незалежно

від конкретного виробника, базуються на єдиному принципі безперервного потоку (Continuous Flow-Through, CFT), що забезпечує оптимальні умови для життєдіяльності дощових черв'яків і пов'язаних із ними мікробіологічних спільнот. Суть цього підходу полягає у створенні модульного середовища, в якому субстрат надходить зверху безперервним потоком, що зображена на рис. 5, а готовий вермікомпост і рідкі продукти (вермічай) вилучаються знизу чи через бічні зйомні лотки без порушення стабільності екосистеми. Завдяки такій організації процесу виключається необхідність великих куп або регулярного перемішування субстрату, що мінімізує стрес для черв'яків і запобігає утворенню анаеробних зон [18]. На рис. 5 зображені системи безперервної дії де: 1 – вхідний бункер; 2 – аерована камера для компостування; 3 – активна зона черв'яка; 4 – дренажний шар; 5 – готовий біогумус; 6 – активна зона черв'яка; 7 – знімні лотки; 8 – кран для вермічаю.

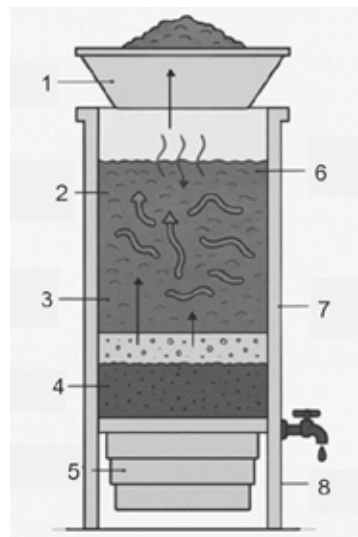


Рис. 5. Системи безперервної дії

Переваги CFT-систем є модульна конструкція дає змогу поетапно збільшувати обсяги переробки органічних відходів у міру зростання потреб виробництва, потужна ефективність від вхідної сировини до кінцевого продукту, безперервне годування черв'яків та збір біогумусу

Недоліки CFT-системи потреба в інвестиціях модульних конструкцій, сітки, механізми збору компосту, вимагає точного виготовлення та регулярного технічного обслуговування, сталі умови вологості, температури та аерації. Конвеєрна вермікомпостувальна система. Конвеєрні вермікомпостери працюють за схемою безперервного тонкошарового компостування. Органічні відходи надходять у верхню частину установки через бункер чи лоток і розподіляються тонким шаром (переважно 5–10 см) по рухомій стрічці чи похилій поверхні. Черв'яки, розселені в цьому шарі, поїдають харчі і водночас поступово мігрують до більш

свіжої маси зверху. Рух стрічки або платформи організовано таким чином, що він компенсує пересування черв'яків: якщо стрічка рухається проти напрямку повзучості, черв'яки залишаються приблизно на тому ж місці у просторі, а спресований компост біля кінця стрічки звільняється від опори і обсипається вниз. Оскільки черв'яки уникають вільного світлого краю шару, вивантажений компост переважно вільний від них.

На рис. 6а і рис. 6б зображені конвеєрні системи де: 1- барабан; 2 – ящик для збору вермічаю; 3 – бункер; 4 – ручка шнеку; 5 – лотки для розподілу субстрату; 6 – ніжки.

У багаторівневих моделей кілька нахилених стрічок укладають одна над одною і з'єднують загальним подільником корму (лінійкою чи лотком). Кожен рівень конвеєра сам містить тонкошарову біомасу, яка рухається вниз. Вага матеріалу та кут нахилу полегшують рух стрічок під навантаженням. Після обробки готовий вермікомпост збирається у нижній частині пристрою: це може бути проста урна, тонкосітчастий барабан (тумблер) або інший механізм відділення.

Таким чином, подача матеріалу зверху, перехід через низку процесних рівнів і збір готового компосту знизу складають ключовий цикл такого вермікомпостера. Рухомі елементи (стрічки, скребки, вали) забезпечують розділення корму і компосту, а піддони чи конвеєри збирають кінцевий продукт.

Переваги даної технології на відміну від традиційних систем, конвеєрні вермікомпостери дозволяють постійно додавати свіжі відходи і одночасно вивантажувати готовий компост. Це забезпечує стабільну активність черв'яків і високу продуктивність без простоїв. Вертикальне нашарування рівнів компостера значно зменшує загальну займану площу при високій продуктивності.

Недоліки конвеєрних систем численні рухомі деталі які ускладнюють конструкцію, потреба в значній енергії через потужні двигуни для ведення конвеєрів під вагою біомаси, вимагання значних інвестицій, інженерна розробка, дотримання оптимальних умов середовища для черв'яків. Надається таблиця 1. Порівняльний аналіз переваг та недоліків.

Рекомендації для застосування. Домашній рівень – оптимальні компактні контейнери об'ємом до 100 л, що не потребують складних установок, але вимагають регулярної ручної роботи. Кооперативний / малий комерційний рівень – багаторушні контейнери об'ємом 200–1000 л із базовими датчиками вологості та температури, здатні обробляти десятки кілограмів відходів на тиждень. Модульна архітектура забезпечує просте масштабування, проте потребує додаткових елементів каркасу та з'єднань, що підвищує вартість і складність монтажу. Промисловий рівень – модельні конвеєрні установки з автоматизованим контролем умов, здатні обробляти сотні кілограмів і навіть тонни органічного субстрату за добу об'ємом більш 1000 л. Вартість багаторушних конструкцій із полімерних або металевих модулів і професійних конвеєрних систем значно вища, ніж у простих контейнерів, що обмежує їх доступність для малих господарств та домогосподарств із обмеженим бюджетом.

Модельні конвеєрні установки можуть слугувати лабораторними платформами для вивчення взаємодій дощових черв'яків із різними типами відходів, а також для селекції штамів із підвищеною стійкістю до стресів і більшою продуктивністю переробки. Високоякісний вермікомпост, отриманий у конвеєрних системах, може стати ключовим елементом замкнутого кругообігу поживних речовин у вертикальних фермах та гідропонних установках. Використання біогумусу як компонента

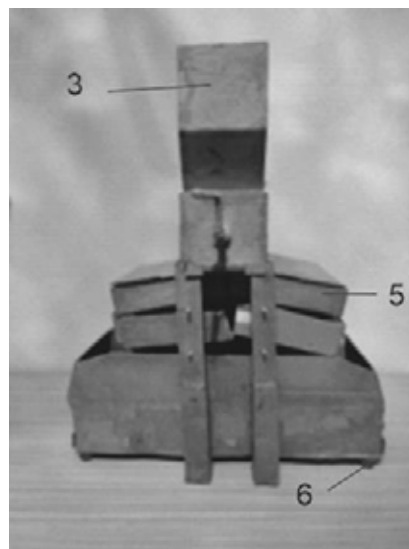
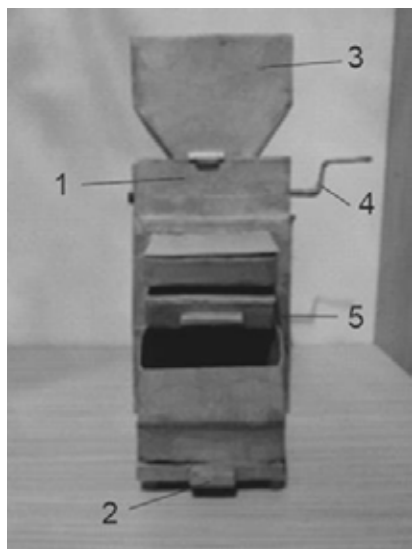


Рис. 6. Конвеєрні системи

Таблиця 1

Порівняльний аналіз переваг та недоліків

Методи вермікомпостування	Переваги	Недоліки
Контейнерні системи	Складається з компактних розмірів, легкості, портативності, можливість використання цілий рік	Менші контейнерні системи мають обмежену здатність переробляти великі обсяги органічних відходів і черв'яки залишаються чутливими до екстремальних температур та заводяться шкідники при перезволоженні субстрату
Траншейні методи та валкові методи	Не потребують складних пристроїв чи автоматизації, можна легко збільшити обсяги обробки продовживши довжину валків або розширивши кількість траншей, відсутність дорогого каркасу чи механізмів, багатошарове укладання багатих на вуглець і на азот матеріалів створює достатню вентиляцію.	Полягають в регулярному перевертанні, поливі і доповненні субстрату, потребують значних трудових витрат.
Барабанні системи	Автоматично перемішуванні та аерації субстрату, можливості безперервного завантаженням органіки, інтенсивність контакту обертового барабану з повітрям	Значні капітальні вкладення, енергоспоживання, ризик перегріву, механічний знос
Вертикальні (лоткові) системи	Переваги лоткових систем полягає в компактності конструкції, природна міграція черв'яків вгору сприя самовивантаження, можливість розділення фаз переміщення черв'яків	Обмеження об'єму кожного лотка, необхідність ручної або механізованої заміни лотків і подачі корму зверху, надмірна вологість перешкоджає міграції черв'яків
Системи безперервної дії	модульна конструкція дає змогу поетапно збільшувати обсяги переробки органічних відходів у міру зростання потреб виробництва, потужна ефективність від вхідної сировини до кінцевого продукту, безперервне годування черв'яків та збір біогумусу	Потреба в інвестиціях модульних конструкцій, сітки, механізми збору компосту, вимагає точного виготовлення та регулярного технічного обслуговування, сталі умови вологості, температури та аерації. Конвеєрна вермікомпостувальна система
Конвеєрні вермікомпостери	Конвеєрні вермікомпостери дозволяють постійно додавати свіжі відходи і одночасно вивантажувати готовий компост	Недоліки конвеєрних систем численні рухомі деталі які ускладнюють конструкцію, потреба в значній енергії через потужні двигуни для ведення конвеєрів під вагою біомаси, вимагання значних інвестицій.

грунтосумішей або поживних середовищ оптимізує ріст рослин і зменшує залежність від мінеральних добрив.

Головні висновки. У результаті порівняльного аналізу технологій вермікультивування можна зробити такі висновки.

1. Контейнерний метод характеризується простою організацією та високою гнучкістю у використанні на малих об'ємах відходів, проте обмежений простір і необхідність ручного відбору біогумусу знижують його продуктивність.

2. Траншейні й валкові системи підходять для великих фермерських господарств завдяки здатності переробляти значні маси субстрату, але потребують ретельного контролю вологості, аерації та температури, а також регулярного обслуговування для запобігання анаеробії та перегріву.

3. Промислові барабанні компостери забезпечують інтенсивний режим переробки з точним контр-

олем кліматичних параметрів, проте вимагають значних капітальних вкладень і обслуговування механічних компонентів.

4. Конвеєрні установки та системи безперервного потоку найкраще відповідають потребам великомасштабного виробництва, поєднуючи мінімальне втручання оператора та високу продуктивність, але їхня складність і вартість роблять їх доцільними лише за відповідного рівня інвестицій і технічної підтримки.

Перспективи використання результатів дослідження. Розроблена модель тонкошарового конвеєрного вермікомпостера може стати основою для компактних модульних установок у густонаселених міських районах і передмістях. Малі блоки CFT-систем легко інтегрувати в комунальні центри збирання органіки, що сприятиме суттєвому зниженню логістичних витрат і викидів CO₂, пов'язаних із транспортуванням відходів.

Література

1. Chattopadhyay G. Use of vermicomposting biotechnology for recycling organic wastes in agriculture. *International Journal Of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2012. Vol. 1, № 1. P. 8. DOI: 10.1186/2251-7715-1-8
2. Vermicomposting: Methods, Process, Mechanisms, Uses. *Microbe Notes*. URL: <https://microbenotes.com/vermicomposting/> (date of access: 27.07.2025).
3. The role of earthworms in sustainable agriculture. *PlantwisePlus Blog*. URL: <https://blog.plantwise.org/2018/09/06/the-role-of-earthworms-in-sustainable-agriculture/> (date of access: 27.07.2025).
4. Vermiculture Technology Book | Earthworm Compost Guide. *Niir Project Consultancy Services*. URL: <https://www.npcsblog.com/the-complete-technology-book-on-vermiculture-and-vermicompost-earthworm-with-manufacturing-process-machinery-equipment-details-plant-layout-2nd-revised-edition/> (date of access: 27.07.2025).
5. Dvořáčková H., Vlček V., Cwíková O., Menoušková K., Záhora J. Vermicomposting of gastro waste does not produce high-quality fertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2024. Vol. 22, № 4. P. 8977–8986. DOI: 10.1007/s13762-024-06225-z
6. Enebe M. C., Erasmus M. Vermicomposting technology – A perspective on vermicompost production technologies, limitations and prospects. *Journal of Environmental Management*. 2023. Vol. 345, P. 118585. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118585
7. Bernstad Saraiva Schott A., Wenzel H., la Cour Jansen J. Identification of decisive factors for greenhouse gas emissions in comparative life cycle assessments of food waste management – an analytical review. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 119. P. 13–24. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.01.079
8. Pirsahab M., Khosravi T., Sharafi K. Domestic scale vermicomposting for solid waste management. *International Journal Of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 2013. Vol. 2, № 1. P. 4. DOI: 10.1186/2251-7715-2-4
9. Dhanushkodi V., Porkodi G. Impact of Vermicomposting Training Programme on Production, Economics and Employment Generation of Farmer – A Case Study. *Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology*. 2018. Vol. 27, № 2. P. 1–5. DOI: 10.9734/AJAEES/2018/43208
10. Вермікомпостування та розведення черв'яків. Верміферма «Кобьярин». Тут виробляють найкращий Біогумус (вермікомпост). Органічні добрива за найкращою ціною в Україні та Київській області. Нам довіряють!. URL: <https://kobyyarin.com.ua/ua/a378370-vermikompstirovanie-razvedenie-chervej.html?srsId=AfmBOorgLhxEL05NQpDYraohneuHim5QsEy3adaSBzC3ewUrmk7H25E2#:~:text=Y%20тому%20випадку,%20якщо%20ви,добре%20контрольований%20i%20керований%20процес> (дата звернення: 28.07.2025).
11. Шагра Б.М., Ніколайчук В.І., Мага І.М. Вермікультура. Ужгород, «Знання». – 2006. – 126 с.
12. Worm Composting. Vermicomposting. The Benefits and Challenges. Pacific Composting Co. URL: <https://pacificcomposting.ca/pages/vermicomposting> (date of access: 28.07.2025).
13. Ali U., Sajid N., Khalid, A., Riaz L., Muaz Rabbani M., Hussain Syed, J., Naseem Malik R. A review on vermicomposting of organic wastes. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. 2015. Vol. 34, № 4. P. 1050–1062. DOI: 10.1002/ep.12100
14. On-farm composting methods. Home. Food and Agriculture Organization of the United Nations. URL: <https://www.fao.org/4/y5104e/y5104e08.htm> (date of access: 28.07.2025).
15. Bot Verification. Red Worm Composting – WAY Too Much Fun With Worms! URL: <https://www.redwormcomposting.com/large-scale-vermicomposting/the-vermicomposting-trench/> (date of access: 28.07.2025).
16. Varma V. S., Kalamdhad A. S. Efficiency of Rotary Drum Composting for Stabilizing Vegetable Waste during Pre-Composting and Vermicomposting. *Environmental Processes*. 2016. Vol. 3, № 4. P. 829–841. DOI: 10.1007/s40710-016-0181-z
17. Hanc A., Castkova T., Kuzel S., Cajthaml T. Dynamics of a vertical-flow windrow vermicomposting system. *Waste Management & Research*. 2017. Vol. 35, № 11. P. 1121–1128. DOI: 10.1177/0734242X17725161
18. Kasam, F. M. Iresha, T. B. Kusuma, R. Umam, A. Mutolib, A. Rahmat Study of organic market waste processing using continuous flow bin vermicomposting meet several nutrient parameters. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 739, № 1. P. 012040. DOI 10.1088/1755-1315/739/1/012040

Дата першого надходження рукопису до видання: 18.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ РЕГІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ТА ШЛЯХИ ЇЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Кожемякін Г.Б.¹, Прутцьков Д.В.¹, Белоконов К.В.¹, Румянцев В.Р.¹, Бендюг В.І.²

¹Запорізький національний університет
вул. Університетська, 66, 69011, м. Запоріжжя

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського»

пр. Берестейський, 37, 03056, м. Київ
kgb04@ukr.net, dmitroprutckov@gmail.com, kv.belokon@gmail.com,
Ruvlad1164@gmail.com, bendiuh.vladyslav@lil.kpi.ua

Метою статті є визначення принципів створення Стратегії управління відходами для охорони довкілля та здоров'я людей, поліпшення ефективності використання ресурсів і енергії, а також стимулювання інновацій та інвестиційного потенціалу регіону через комплексне зменшення відходів. Це досягається шляхом прогнозування та визначення джерел їх утворення в усіх сферах виробництва, обслуговування, транспорту, споживання та повсякденної діяльності, ідентифікації видів відходів, їх роздільного збору, сортування та переробки за оптимальними схемами санітарного очищення. Крім того, планується впровадження публічно-приватного партнерства, зменшення обсягів відходів і забезпечення їх рециклінгу, утилізації та видалення за допомогою кращих доступних технологій.

Методологія дослідження ґрунтується на вивченні науково-практичного досвіду, європейського законодавства, а також національної законодавчої та нормативно-технічної бази. Основні завдання для створення Стратегії управління відходами: здійснення перманентної оцінки балансу матеріальних, енергетичних та інших ресурсів; прогнозування утворення та попередня ідентифікація утворюваних відходів; послідовне впровадження гнучкої системи тарифів та засобів економічного та соціального заохочення суб'єктів управління відходами; паспортизація відходів; формування відповідної матеріально-технічної бази та інфраструктури з роздільного збирання, сортування і переробки відходів; проведення необхідних заходів для впровадження роздільного збирання невикористаних відходів; фахову перепідготовку спеціалістів виробництв і підприємств з питань управління відходами; розробка оптимальних схем санітарного очищення населених пунктів; реформування системи збирання, транспортування, переробки, утилізації та видалення відходів; створення сортувально-переробних комплексів; видалення неутілізованих відходів на полігони з використанням передових технологій; реконструкції існуючих полігонів у сучасні підприємства; залучення фахової та суспільної громадськості до обговорення планів управління відходами; постійне висвітлення і обговорення у медіа завдань і стану впровадження регіонального плану управління відходами; включення відповідних розділів та спеціальних курсів до системи освіти; налагодження співробітництва між регіонами України та з органами самоврядування інших країн; проведення маркетингових досліджень і розвиток партнерства щодо залучення зовнішніх інвестувань для впровадження передових технологій.

Шляхи реалізації стратегії базуються на наступних складових: організація ефективної роботи та узгодженість дій суб'єктів; правове забезпечення; фінансово-економічне забезпечення; наукове та інформаційне забезпечення; освіта, виховання та формування громадської думки; міжнародне співробітництво. Визначені принципи можуть використовуватися органами державного управління та місцевого самоврядування при створенні регіональних систем управління відходами. *Ключові слова:* стратегія, управління відходами, регіональний план, рециклінг, утилізація, тверді побутові відходи, кращі доступні технології

Principles of Developing a Regional Waste Management Strategy and Pathways for Effective Implementation. Kozhemiakin G., Pruttskov D., Belokon K., Rumiantsev V., Bendyuh V.

The purpose of the article is to determine the principles of developing a Waste Management Strategy for environmental protection and human health, improving the efficiency of resource and energy use, as well as stimulating innovation and investment potential of the region through comprehensive waste reduction. The way to do this is by predicting and figuring out where it comes from in all areas of production, services, transport, consumption, and everyday activities, identifying the types of waste, collecting it separately, sorting it, and recycling it using the best sanitation methods.

In addition, it is planned to implement a public-private partnership, reducing waste volumes and ensuring their recycling, utilization and disposal using the best available technologies.

The research methodology is grounded in the analysis of scientific literature, practical case studies, European legislation, and the national legislative, regulatory, and technical frameworks.

The main tasks for developing a Waste Management Strategy: carrying out a permanent assessment of the balance of material, energy and other resources; forecasting the formation and preliminary identification of generated waste; consistent implementation of a flexible system of tariffs and means of economic and social incentives for waste management entities; waste certification; formation of an appropriate material and technical base and infrastructure for separate collection, sorting and processing of waste; carrying out the necessary measures to implement separate collection of non-productive waste; professional retraining of specialists of industries and enterprises on waste management issues; development of optimal schemes for sanitary cleaning of settlements; reforming the system of collection, transportation, processing, utilization and disposal of waste; creation of sorting and processing complexes; removal of unutilized waste to landfills using advanced technologies; reconstruction of existing landfills into modern enterprises; involvement

of professional and public communities in discussing waste management plans; constant coverage and discussion in the media of the tasks and status of implementation of the regional waste management plan; inclusion of relevant sections and special courses in the education system; establishing cooperation between regions of Ukraine and with self-government bodies of other countries; conducting marketing research and developing partnerships to attract external investments for the implementation of advanced technologies.

The ways of implementing the strategy are based on the following components: organizing effective work and coordination of actions of subjects; legal support; financial and economic support; scientific and information support; education, upbringing and formation of public opinion; international cooperation. State administration bodies and local governments when creating regional waste management systems can use the identified principles. *Key words:* strategy, waste management, regional plan, recycling, utilization, solid waste, best available technologies (BAT)

Постановка проблеми. Метою розробки Стратегії управління відходами (далі Стратегії) є захист довкілля і здоров'я населення, покращення ресурсо-, енергозбереження і зростання інноваційно-інвестиційного потенціалу регіону.

Актуальність дослідження. Системна мінімізація відходів через прогнозування і виявлення місць їх утворення в усіх сферах виробництва, послуг, транспортування, споживання та життєдіяльності, ідентифікація утворюваних відходів, їх роздільне збирання, сортування і переробка за оптимальною схемою санітарного очищення та реалізація публічно-приватного партнерства є важливим для планування зменшення обсягів утворення і забезпечення рециклінгу, утилізації та видалення відходів за кращими доступними технологіями (Best Available Techniques (BAT)).

Аналіз досліджень і публікацій. Визначення принципів створення регіональних Стратегій управління відходами формується на аналізі науково-практичного досвіду [1, 2], Європейського законодавства [3-6], вітчизняної законодавчої [7-12] та нормативно-технічної [13-16] бази.

Виклад основного матеріалу. Досягнення мети Стратегії можливе за умови комплексного підходу до розв'язання проблем у сфері управління різними категоріями (видами) відходів. Основні завдання для досягнення цієї мети:

- здійснення перманентної оцінки балансу матеріальних, енергетичних та інших ресурсів що надходять і використовуються у регіоні та є першоджерелами утворення відходів;
- прогнозування утворення та попередня ідентифікація утворюваних відходів як речовин/матеріалів. Порядок найменування відходів за генетичним принципом і віднесення їх до класифікаційних категорій на основі аналізу товарних потоків та процесів виробництва, послуг, споживання і життєдіяльності за Порядком класифікації відходів та Національним переліком відходів;
- послідовне впровадження гнучкої наскрізної системи тарифів та інших засобів економічного та соціального заохочення виробників, населення та спеціалізованих підприємств до належного поводження з визначеними видами відходів;
- паспортизація згідно з ДСТУ 2195-99 тих відходів, щодо яких, за даними первинного обліку, не має прийнятних технологічних рішень задля їх переробки, утилізації чи видалення; результатом паспортизації є визначення кращих доступних технологій;

- формування на цій основі відповідної матеріально-технічної бази та інфраструктури з роздільного збирання, сортування і переробки прогнозованих і утворюваних відходів, що розбудовуватиметься і діятиме за принципом публічно-приватного партнерства;

- проведення необхідних заходів, включаючи роз'яснювальну роботу і навчання населення для впровадження роздільного збирання невиробничих відходів, а також фахову перепідготовку спеціалістів виробництв і підприємств з питань управління відходами;

- розробка оптимальних схем санітарного очищення населених пунктів;

- реформування системи збирання, транспортування, переробки, утилізації та видалення відходів, що утворюються у муніципальній та виробничій сферах за принципами публічно-приватного партнерства;

- створення сортувально-переробних комплексів, що забезпечуватимуть послідовне поглиблення переробки відсортованих відходів, зростання обсягів їх утилізації та видалення неутілізованих відходів на полігони з використанням BAT; укладення угод з промисловими підприємствами щодо розміщення на підприємствах міста потужностей для переробки і утилізації певних категорій відходів та виготовлення необхідного обладнання;

- реконструкції існуючих полігонів у сучасні підприємства, зокрема для забезпечення максимального ущільнення і зменшення обсягів видалення невідсортованих і неперероблених відходів, застосування сучасних технологій утилізації матеріально-енергетичного потенціалу органічної складової потоку відходів, звалищного метану і фільтрату;

- послідовне залучення фахової та суспільної громадськості до обговорення планів управління відходами для забезпечення їх адекватного сприйняття та втілення різними верствами населення, забезпечення постійного висвітлення і обговорення ЗМІ завдань і стану впровадження стратегії та плану управління відходами;

- вироблення наскрізних системних пропозицій щодо включення відповідних розділів та спеціальних курсів до наявної системи освіти;

- налагодження співробітництва з іншими областями України та у транскордонній формі – з органами самоврядування інших країн, у першу чергу Європейського союзу;

– проведення маркетингових досліджень і розвиток партнерства щодо залучення до виробництва, сфери послуг та муніципального господарства інноваційних рішень та внутрішніх і зовнішніх інвестицій для впровадження ВАТ;

Першочерговим є вирішення проблем у сфері управління твердими побутовими відходами (ТПВ). У цьому напрямі передбачається здійснення необхідних (базових) заходів із забезпечення санітарного очищення населених пунктів, також впровадження заходів, спрямованих на вилучення ресурсних складових та небезпечних відходів у складі ТПВ, а також створення умов для залучення інвестиційного капіталу у сферу управління відходами.

Система управління відходами повинна створюватись з урахуванням Схеми планування території регіону. Створення потужностей з переробки (сортування) відходів планується здійснювати з орієнтацією на ТПВ головних планувальних центрів з урахуванням можливостей забезпечення та перероблення відходів інших населених пунктів, розташованих на відстані, за якою забезпечується економічна доцільність транспортування ТПВ.

Забезпечення зниження навантаження на довкілля, зумовленого промисловими відходами планується шляхом проведення системної інформаційної роботи, адміністративного сприяння впровадженню заходів, спрямованих на попередження утворення відходів їх перероблення та безпечного видалення.

Шляхи реалізації стратегії базуються на наступних складових:

1. Організація ефективної роботи та узгодженість дій суб'єктів.
2. Правове забезпечення.
3. Фінансово-економічне забезпечення.
4. Наукове та інформаційне забезпечення.
5. Освіта, виховання та формування громадської думки.
6. Міжнародне співробітництво.

Учасники реалізації Стратегії – структурні підрозділи обласних та районних державних адміністрацій, виконавчі комітети місцевих рад, комунальні підприємства місцевих рад, підприємства, установи та організації регіону.

Досягнення мети з удосконалення системи управління відходами в регіоні можливе лише за умови інтеграції зусиль відповідальних виконавців та учасників реалізації стратегії.

Для підвищення ефективності системи управління відходами необхідно її удосконалення з урахуванням стандартів серії ISO 14000.

Підвищення ефективності виконання заходів плану управління відходами досягається за рахунок наукового опрацювання технічних та організаційних рішень щодо управління екологічною діяльністю.

Обласні, районні державні адміністрації та їх структурні підрозділи, місцеві ради та їх виконавчі

органи забезпечують адміністративну та організаційну підтримку підприємствам, що спеціалізуються на діяльності у сфері управління відходами шляхом:

- створення адміністративно-економічних умов для розвитку та підвищення якості послуг;
- регулярного залучення до участі в реалізації Стратегії профільних підприємств у законодавчо установленому порядку;
- сприяння підприємствам усіх форм власності в їх діяльності у сфері управління відходами, що стосуються виконання плану управління відходами (далі Плану), але не передбачає бюджетного фінансування.

Правові засади реалізації Стратегії та виконання Плану складаються із чинного галузевого законодавства та нормативних актів місцевого рівня.

Для належного виконання Плану на рівні регіону необхідно розробити нормативні акти щодо реалізації заходів та вдосконалення системи управління відходами на місцевому рівні.

Фінансово-економічний механізм реалізації Стратегії включає в себе засоби економічного та фінансового забезпечення діяльності у сфері управління відходами.

Джерелами фінансування заходів Плану є:

- обласний бюджет, у тому числі обласний фонд охорони навколишнього природного середовища;
- місцеві бюджети, у тому числі місцеві фонди охорони навколишнього природного середовища; в установленому законодавством порядку;
- кошти підприємств, установ та організацій;
- кошти, залучені за рахунок інвестицій, кредитів та безповоротної допомоги.

З метою підвищення ефективності використання фінансових ресурсів, поточне планування заходів за Планом слід здійснювати з урахуванням інших галузевих та державних програм, які діють в регіоні та містять заходи, що мають відношення до сфери управління відходами, але передбачають фінансування з інших джерел.

Для виконання природоохоронних заходів та проектів, що потребують значних обсягів фінансування, можуть залучатися кошти з різних джерел, що не заборонені чинним законодавством (обласний та місцеві бюджети, а також кошти підприємств та організацій). Також необхідно передбачати можливість залучення державного фінансування.

Ефективна реалізація Стратегії передбачає наукове опрацювання існуючих наукових знань та інформації на предмет їх прикладного використання, наукове опрацювання проектів, заходів та управлінських рішень у сфері управління відходами.

Належне виконання Плану вимагає якісного інформаційного забезпечення. Обласні, районні державні адміністрації та місцеві ради, підприємства і організації регіону повинні мати об'єктивну інформацію про стан справ у сфері управління відходами.

Основними джерелами такої інформації мають бути дані моніторингу сфери управління відходами та довкілля, а також дані державного статистичного спостереження.

Обласні, районні державні адміністрації та місцеві ради повинні забезпечувати доступ зацікавлених суб'єктів до інформації про стан справ у сфері управління відходами.

Сфера управління відходами є одним із напрямків природоохоронної діяльності. Невід'ємними елементами природоохоронної діяльності є екологічна освіта і виховання та активна участь громадськості.

Ефективність функціонування системи управління відходами у великій мірі визначається рівнем кваліфікації представників влади, що залучені до управління у цій сфері, освіченістю та активністю участі в процесі громадськості.

Підвищення рівня екологічної культури та знань досягається шляхом системної реалізації екологічних освітніх проектів та заходів.

З отриманого в Україні досвіду можна зробити висновок, що без активної роботи з населенням неможливо досягнути успіху. Основною метою проведення роботи з населенням є зміна їх поведінки та руйнування роками створених стереотипів. Тому інформаційно-виховні кампанії відіграють важливу роль на всіх стадіях реалізації Стратегії та повинні проводитися першочергово, ще до початку реалізації заходів, передбачених Планом. Запорукою успіху реалізації Стратегії є публічність, прозорість та відкритість, оскільки поведінка людей і їхнє позитивне сприйняття цих процесів має вирішальне значення.

Інформаційно-виховні заходи мають бути проведені з метою підвищення рівня екологічної культури населення та залучення мешканців міста до підтримки роботи систем управління відходами. Освітньо-виховні та інформаційні кампанії мають включати такі компоненти:

- кампанії у засобах масової інформації;
- кампанії з підвищення поінформованості населення у місцях проживання;
- кампанії в освітніх закладах;

Ефективне розв'язання визначених проблем потребує залучення громадськості до участі у при-

йнятті рішень з питань управління відходами, здійснення громадського екологічного контролю, реалізації громадських проектів у сфері охорони довкілля та благоустрою.

Планування і реалізація природоохоронної діяльності в масштабах регіону повинно враховувати державну політику міжнародного співробітництва, використання передового світового досвіду в сфері управління відходами.

Міжнародне співробітництво передбачає:

- забезпечення реалізації на території регіону прийнятих міжнародних угод у сфері управління відходами;
- сприяння впровадженню на території області міжнародних програм технічної допомоги у сфері управління відходами.

Висновки. Визначено принципи створення Стратегії управління відходами для охорони довкілля та здоров'я людей, поліпшення ефективності використання ресурсів і енергії, а також стимулювання інновацій та інвестиційного потенціалу регіону через комплексне зменшення відходів. Таким чином, Стратегія складається з наступних частин: загальні положення; стан управління (в т.ч. SWOT-аналіз) відходами в регіоні; гармонізація регіональних правових актів з законодавством України та Євросоюзу у сфері управління відходами; принципи та напрями зменшення утворення обсягів відходів; засади норм екологічної безпеки при утилізації, знешкодженні, повторному використанні, переробці, транспортуванні та видаленні відходів; удосконалення системи обліку відходів; принципи економічного регулювання управління відходами; основні напрями та система індикаторів використання відходів; система екологічної освіти та виховання у сфері управління відходами; систему стимулювання заходів з наукових досліджень, розробки та впровадження ефективних технологій утилізації та переробки відходів; напрями міжрегіонального та міжнародного співробітництва у сфері управління відходами; форми реалізації положень Стратегії управління відходами; ресурсне та фінансове забезпечення впровадження положень Стратегії; етапи реалізації Стратегії.

Література

1. Колодійчук І. А. Формування територіально збалансованих систем управління відходами: регіональний вимір : монографія. Львів : ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долішнього НАН України», 2020. 524 с.
2. Практичні аспекти управління відходами в Україні. Посібник / Барінов М. О., Олексієв Ш. Л., Родная Д. В., Журавель Т. В., Коломієць С. В., Козлова І. А., Пархоменко Г. П. Київ : «Поліграф плюс», 2021. 118с.
3. Директиви Ради Європи 1999/31/ЄС від 26 квітня 1999 р. про захоронення відходів із змінами і доповненнями, внесеними Регламентом (ЄС) № 1882/2003 / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_925#Text (дата звернення: 20.07.2025).
4. Директиви 2008/98/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 19 листопада 2008 р. про відходи / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_029-08#Text (дата звернення: 20.07.2025).
5. Директиви 2006/21/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 15 березня 2006 р. про управління відходами видобувної промисловості та внесення змін і доповнень до Директиви 2004/35/ЄС / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_016-06#Text (дата звернення: 20.07.2025).

6. Базельська конвенція «Про контроль за транскордонним перевезенням небезпечних відходів та їх видаленням» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_022#Text (дата звернення: 20.07.2025).
7. Закон України від 20 червня 2022 року № 2320-IX «Про управління відходами» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
8. Закон України від 14 вересня 2000 року № 1947-III «Про Загальнодержавну програму поводження з токсичними відходами» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1947-14#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
9. Кабінет міністрів України. Постанова від 4 серпня 2023 р. № 816 «Деякі питання розроблення регіональних стратегій розвитку і планів заходів з їх реалізації та проведення моніторингу реалізації зазначених стратегій і планів заходів» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/816-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
10. Кабінет міністрів України. Постанова від 30 червня 2023 р. № 667 «Про затвердження Порядку розроблення та затвердження регіональних планів управління відходами» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/667-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
11. Кабінет міністрів України. Постанова від 4 березня 2004 р. N265 «Про затвердження Програми поводження з твердими побутовими відходами» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/265-2004-%D0%BF#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
12. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Наказ від 13.12.2023 № 1130 «Про затвердження Методики роздільного збирання побутових відходів» / База даних «Законодавство України»/ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0168-24#Text> (дата звернення: 20.07.2025).
13. Державні будівельні норми України. Проектування. Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. Київ : Держбуд України, 2005. 100 с.
14. ДСТУ 2195-99 Охорона природи. Поводження з відходами. Технічний паспорт відходу. Склад, вміст, виклад і правила внесення змін. Київ : Держстандарт України, 2000. 22 с.
15. ДСТУ 3910-99 Охорона природи. Поводження з відходами. Класифікація відходів. Порядок найменування відходів за генетичним принципом і віднесення їх до класифікаційних категорій. Київ : Держстандарт України, 2000. 18 с.
16. ДСТУ 3911-99 Охорона природи. Поводження з відходами. Виявлення відходів і подання інформаційних даних про відходи. Загальні вимоги. Київ : Держстандарт України, 2000. 18 с.

Дата першого надходження рукопису до видання: 17.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СПОСОБІВ ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ НА ДОВКІЛЛЯ

Панас Н.Є.

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій

імені С.З. Гжицького

вул. Пекарська, 50, 79010, м. Львів

panas.natalia.edu@gmail.com

Метою статті є наукове обґрунтування екологічних та мікробіологічних наслідків різних способів поводження з відходами та оцінка їхнього впливу на біорізноманіття, зокрема мікроорганізмів, що виконують ключові функції в екосистемах. Об'єктом дослідження виступають сучасні практики управління твердими та органічними відходами, а також їх взаємозв'язок із динамікою стану ґрунтових і водних мікробіоценозів. У статті обґрунтовано екологічну та біологічну важливість системного оцінювання впливу різних способів поводження з відходами на стан довкілля, зокрема з урахуванням функціонування мікроорганізмів як чутливих індикаторів порушення екологічної рівноваги. Визначено, що сучасні практики утилізації та захоронення відходів істотно впливають на склад і життєдіяльність мікробіоценозів у ґрунтових і водних середовищах. Доведено, що неконтрольоване спалювання, скидання та тривале захоронення відходів призводить до пригнічення автотрофних і сапрофітних мікроорганізмів, зміщення біохімічних циклів і формування токсичного середовища для природного відновлення екосистем. Охарактеризовано роль мікроорганізмів у біодеструкції органічних сполук, участі в кругообігу речовин, забезпеченні родючості ґрунтів і самоочищенні води. Встановлено, що органічні технології, такі як компостування, біоконверсія або анаеробне зброджування, можуть створити умови для підтримки активності корисної мікрофлори, однак потребують належного контролю параметрів середовища. Особливу увагу приділено впливу цифровізації на систему екологічного моніторингу. Доведено, що використання цифрових технологій, включно з сенсорними станціями, біоінформатикою та супутниковими даними, значно розширює можливості вивчення стану мікробних спільнот та оперативного реагування на критичні зміни в екосистемах. Стаття формує теоретико-науковий базис для подальших досліджень з урахуванням екологічної мікробіології, цифрових інструментів і стратегії сталого й безпечного розвитку. *Ключові слова:* поводження з відходами, мікроорганізми, екосистема, цифровізація, біобезпека, забруднення, ґрунт, вода, біомоніторинг, мікробіоценоз

Ecological assessment of the impact of waste management methods on the environment. Panas N.

The purpose of the article is to scientifically substantiate the ecological and microbiological consequences of various waste management methods and assess their impact on biodiversity, in particular microorganisms that perform key functions in ecosystems. The object of the study is modern practices of solid and organic waste management, as well as their relationship with the dynamics of the state of soil and aquatic microbiocenoses. The article substantiates the ecological and biological importance of a systematic assessment of the impact of various waste management methods on the state of the environment, in particular, taking into account the functioning of microorganisms as sensitive indicators of ecological imbalance. It is determined that modern practices of waste utilization and disposal significantly affect the composition and vital activity of microbiocenoses in soil and aquatic environments. It has been proven that uncontrolled burning, dumping and long-term burial of waste leads to the suppression of autotrophic and saprophytic microorganisms, the displacement of biochemical cycles and the formation of a toxic environment for the natural restoration of ecosystems. The role of microorganisms in the biodestruction of organic compounds, participation in the cycle of substances, ensuring soil fertility and self-purification of water has been characterized. It has been established that organic technologies, such as composting, bioconversion or anaerobic digestion, can create conditions for maintaining the activity of beneficial microflora, but require proper control of environmental parameters. Particular attention is paid to the impact of digitalization on the environmental monitoring system. It has been proven that the use of digital technologies, including sensor stations, bioinformatics and satellite data, significantly expands the possibilities of studying the state of microbial communities and responding promptly to critical changes in ecosystems. The article forms a theoretical and scientific basis for further research taking into account environmental microbiology, digital tools and strategies for sustainable and safe development. *Key words:* waste management, microorganisms, ecosystem, digitalization, biosafety, pollution, soil, water, biomonitoring, microbiocenosis

Постановка проблеми. Зростання обсягів побутових, промислових та аграрних відходів створює серйозне навантаження на екосистеми, змінюючи умови існування багатьох біологічних агентів, включаючи мікроорганізми. Саме мікроорганізми відіграють ключову роль у процесах самоочищення ґрунтів, води та атмосферного повітря, регулюють колообіг елементів (азоту, вуглецю, сірки) та впливають на стабільність біогеохімічних процесів. Але за наявності токсичних сполук, важких мета-

лів чи полімерів, які потрапляють у довкілля внаслідок неефективного або неконтрольованого поводження з відходами, мікробіоценози змінюються. Відтак, зменшується різноманіття, пригнічуються природні функції, активізуються патогенні або умовно-патогенні види. Це може призвести до глибоких порушень природного середовища, зниження родючості ґрунтів, погіршення якості води та формування небезпечних біологічних «гарячих точок».

Актуальність дослідження. Біологічний підхід до аналізу впливу поводження з відходами на довкілля дозволяє не лише оцінити безпосередню шкоду, але й зрозуміти довготривалі наслідки для екологічної рівноваги. Наприклад, застосування біодеградабельних матеріалів або компостування органічних відходів активізує діяльність ґрунтових мікроорганізмів, сприяє біоремедіації та відновленню природних біоценозів. У той час як спалювання або захоронення великої кількості органічних відходів на полігонах може створювати анаеробні умови, що сприяють розмноженню метанотворювальних архей та інших мікроорганізмів, здатних змінювати газовий баланс атмосфери. Таким чином, розуміння і науково обґрунтоване оцінювання способів поводження з відходами з біологічної точки зору дозволяє формувати ефективні екологічні стратегії, які базуються не лише на технологіях, але й на підтримці біологічної рівноваги, збереженні активності природних мікробних угруповань та мінімізації антропогенного впливу на живу природу.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими і практичними завданнями. наукове обґрунтування екологічних та мікробіологічних наслідків різних способів поводження з відходами та оцінка їхнього впливу на біорізноманіття, зокрема мікроорганізмів, що виконують ключові функції в екосистемах та безпосередній вплив цифровізації на цей процес оцінки досі залишається важливим науково-практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання впливу способів поводження з відходами на довкілля дедалі активніше досліджується у вітчизняній науковій літературі з міждисциплінарних позицій, зокрема в контексті біоекологічної безпеки, економіки природокористування, мікробіологічних процесів та цифровізації систем моніторингу [1-10]. У роботі Купалової, Гончаренко, Андрусів, Олешко та Демченко [1] охарактеризовано важливість екологічної модернізації виробництва в контексті інноваційного розвитку, що передбачає не лише впровадження технологій зменшення шкідливих викидів, а й врахування біологічної реакції довкілля на залишкові компоненти. Зокрема, автори наголошують на потребі врахування мікробіологічних змін у зоні впливу промислових відходів як основи сталого розвитку підприємств. Особливу увагу дослідники приділяють аграрному сектору, який продукує значну кількість біорозкладних відходів. У праці Карбовської, Мазура, Железняка та ін. [2] визначено організаційно-фінансові аспекти управління аграрними відходами, що мають прямий вплив на якість ґрунтової мікрофлори та здатність мікроорганізмів до самоочищення середовища. Водночас Хільчевський, Забокрицька та Кравчинський [3] у своїй ґрунтовній праці доводять, що стандартизація управління відходами має включати мікробіологічні критерії, оскільки порушення екологічного

балансу мікроорганізмів є раннім індикатором деградації екосистем. Це узгоджується з підходами циркулярної економіки, представленими у дослідженні Горбаль, Адамів та Чумака [4], де обґрунтовано ефективність впровадження замкнених біологічних циклів поводження з органічними залишками. Регіональний вимір управління відходами, з урахуванням локальної екологічної ситуації, проаналізовано в монографії Колодійчука [5], де встановлено важливість мікрорівневого моніторингу, зокрема за участю мікроорганізмів, для забезпечення біобезпеки. Сафранов, Шаніна, Губанова та Приходько [6] акцентують увагу на класифікації небезпечної складової твердих побутових відходів, яка має токсичний вплив на мікробіоту ґрунту і води, включаючи здатність деяких хімічних сполук блокувати метаболічну активність корисних мікроорганізмів. На цьому фоні Залознова, Сердюк і Петрова [7] доводять, що інтерналізація зовнішніх негативних ефектів у виробничому середовищі має враховувати біоіндикаторні дані про деградацію мікробіоценозів як економічно значущий чинник втрати екологічних функцій довкілля. Ю. Маковецька [8] зазначає, що адаптація українського законодавства до вимог Європейського Союзу у сфері управління відходами наразі відбувається нерівномірно, що ускладнює системний облік біологічних наслідків таких процесів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Метою статті є наукове обґрунтування екологічних та мікробіологічних наслідків різних способів поводження з відходами та оцінка їхнього впливу на біорізноманіття, зокрема мікроорганізмів, що виконують ключові функції в екосистемах. Об'єктом дослідження виступають сучасні практики управління твердими та органічними відходами, а також їх взаємозв'язок із динамікою стану ґрунтових і водних мікробіоценозів.

Новизна. Із залученням даних наукової літератури проведено поглиблений аналіз джерел, виокремлено основні причини проведення екологічної оцінки впливу способів поводження з відходами на довкілля, охарактеризовано вплив поводження з відходами на водне середовище та мікробіоценози, визначено напрямки застосування цифрових технологій для оцінювання впливу поводження з відходами на довкілля.

Методологія. Методологія даного дослідження включає використання різноманітних методів, зокрема: метод індукції та дедукції для аналізу сутності та змісту оцінювання впливу способів поводження з відходами на довкілля; метод порівняння і систематизації при оцінці впливу способів поводження з відходами на довкілля; метод синтезу і аналізу при дослідженні ключових напрямків застосування цифрових технологій для оцінювання впливу способів поводження з відходами на довкілля; графічний та табличний методи для наочного представ-

лення даних для кращої характеристики отриманих результатів; абстрактно-логічний метод для формування теоретичних узагальнень та висновків.

Виклад основного матеріалу. Поводження з відходами є одним із головних чинників, що формують стан довкілля в умовах зростаючого антропогенного навантаження. Від того, яким чином суспільство організовує збирання, перероблення, зберігання або утилізацію відходів, значною мірою залежить стан ґрунтів, водних екосистем і атмосфери. Багато сучасних практик, зокрема неконтрольоване захоронення або спалювання твердих побутових і промислових відходів, спричиняють викид токсичних сполук, що мають здатність накопичуватись у ланцюгах живлення. Відтак, це завдає шкоди не лише вищим тваринам і рослинам, а й мікроорганізмам які є основою функціонування екосистем. Мікроорганізми виконують безліч важливих функцій у довкіллі, зокрема регулюють кругообіг речовин, розкладають органічні рештки та нейтралізують забруднювальні сполуки. У процесі біодеградації мікроорганізми розкладають складні органічні сполуки до простих речовин. Саме завдяки їхній діяльності ґрунт зберігає свою родючість а водойми не перетворюються на непридатні до життя зони. Однак наявність шкідливих речовин у відходах таких як важкі метали, синтетичні полімери, фармацевтичні залишки або феноли чинить сильний тиск на мікробні спільноти. Це проявляється у зниженні видової різноманітності мікроорганізмів зміні співвідношення автотрофних і гетеротрофних форм порушенні механізмів само-

регуляції екосистем. Наприклад, у ґрунтах поблизу полігонів побутових відходів часто фіксують домінування стійких до токсичних сполук мікроорганізмів що водночас втрачають здатність до участі в природних біохімічних циклах (рис. 1).

Особливу тривогу викликає вплив поведінки з відходами на водне середовище. Через інфільтрацію фільтратів зі сміттєзвалищ і забруднення стічними водами до річок і озер потрапляє величезна кількість органіки, фосфатів, нітратів і токсичних речовин. У відповідь мікроорганізми активізують процеси біохімічного розкладання що супроводжується зниженням вмісту кисню і розвитком анаеробних умов. Така ситуація сприяє розмноженню анаеробних бактерій у тому числі патогенних, а також водоростей що викликають цвітіння води і масову загибель риби. Біологічні наслідки забруднення можуть бути тривалими і невідворотними особливо якщо порушується рівновага між трофічними рівнями та руйнуються стійкі ланцюги живлення. На додаток слід наголосити на важливості дослідження впливу методів утилізації органічних відходів з точки зору збереження активності природних мікробіоценозів. Такі методи як компостування, анаеробне зброджування або біоконверсія за участі дощових черв'яків і бактеріальних культур мають потенціал не лише зменшувати обсяги відходів але й повертати в біосферу корисні продукти у вигляді біогазу гумусу або біодобрив. За правильно підібраних умов мікроорганізми прискорюють розклад органіки зберігають мікрофлору ґрунту і зменшують навантаження на

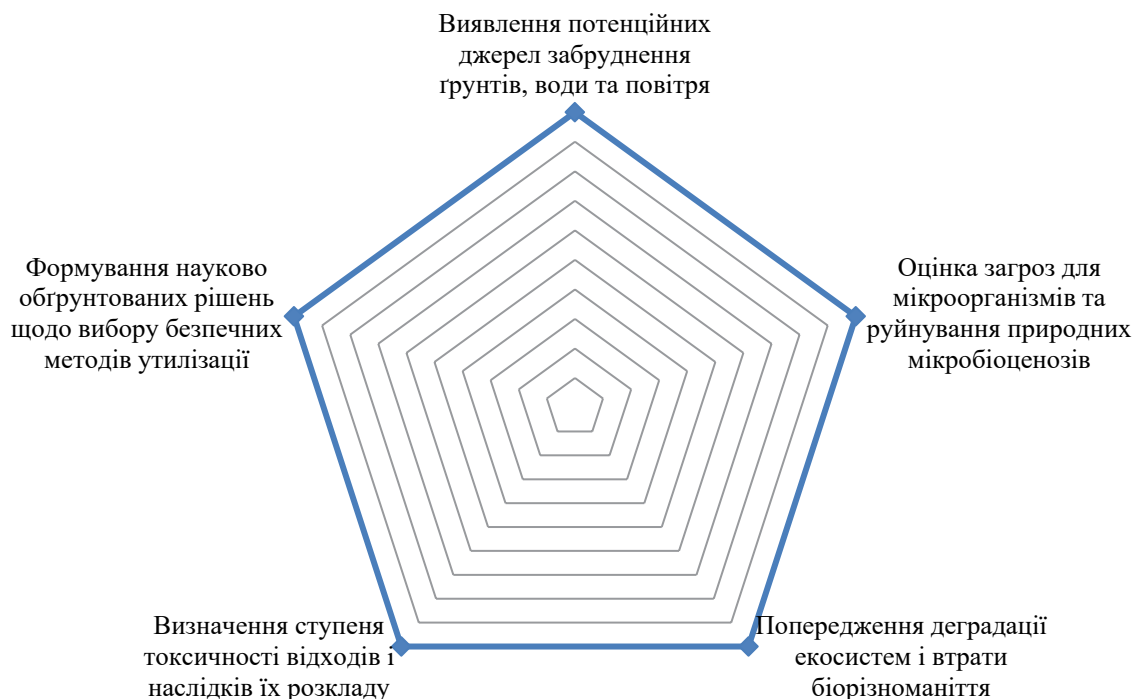


Рис. 1. Основні причини проведення екологічної оцінки впливу способів поводження з відходами на довкілля

полігони. Водночас при недотриманні температурного або вологості режиму компост може стати джерелом інфекцій або летких органічних сполук що мають негативний вплив на здоров'я людей (табл. 1).

Цифровізація значно посилила ефективність оцінювання впливу способів поводження з відходами на довкілля, відкривши нові можливості для моніторингу та аналізу мікробіологічних процесів. Завдяки використанню сенсорних систем, супутникових знімків, автоматизованих станцій спостереження та програмного забезпечення для обробки великих даних стало можливим у режимі реального часу відстежувати зміну складу мікроорганізмів у ґрунті й воді, виявляти токсичні забруднення та моделювати вплив різних сценаріїв утилізації на екологічну рівновагу. Біоінформатика та цифрові бази даних дозволяють швидко ідентифікувати патогенні штами, а також оцінити адаптаційні механізми природних мікробіоценозів у відповідь на різні типи відходів. Внаслідок цього цифрові технології стали критично важливими інструментами не лише в прогнозуванні екологічних ризиків, але й у розробці біологічно безпечних методів утилізації з урахуванням біоактивності довкілля (табл. 2).

Отже біологічний аспект оцінювання впливу поводження з відходами на довкілля дозволяє виявити критичні точки у функціонуванні природних систем та запропонувати ефективні рішення на основі підтримки мікробної рівноваги. Саме мікроорганізми є індикаторами екологічного благополуччя території а також агентами відновлення і очищення. Їхня чутливість до змін навколишнього середовища дозволяє оцінювати якість води, ґрунтів і повітря. У зв'язку з цим інтеграція мікробіологічного моніторингу в стратегії поводження з відходами є не лише актуальним завданням але й запорукою сталого розвитку екосистем.

Головні висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що способи поводження з відходами мають глибокий і багатовекторний вплив на довкілля, особливо через зміну структури та активності мікроорганізмів. Визначено, що саме мікробіота ґрунтів і водних екосистем першою реагує на токсичні впливи, порушення балансу органіки та наявність важких металів, пластиків чи агресивних сполук у відходах. Охарактеризовано, що пригнічення природної мікрофлори веде до порушення біогеохімічних циклів, деградації родючості ґрунтів, зниження здатності водойм до самоочищення та

Таблиця 1

Вплив поводження з відходами на водне середовище та мікробіоценози

Проблема або явище	Біологічна реакція мікроорганізмів	Можливий екологічний наслідок
Інфільтрація фільтратів і стічні води	Активізація анаеробного розкладу	Зниження вмісту кисню, розвиток анаеробних умов
Надлишок фосфатів і органіки	Масове розмноження водоростей і бактерій	Цвітіння води, загибель риби, порушення трофічних ланцюгів
Порушення трофічної рівноваги	Зміна складу мікробіоценозів, зникнення чутливих видів	Деградація екосистем, незворотні біологічні зрушення
Компостування та біоконверсія	Стимуляція корисної мікрофлори, вироблення гумусу	Відновлення ґрунтів, зменшення потреби в полігонах
Неправильні умови компостування	Поява патогенів, утворення летких органічних речовин	Потенційна загроза здоров'ю людей, додаткове забруднення повітря

Таблиця 2

Напрямки застосування цифрових технологій для оцінювання впливу поводження з відходами на довкілля

Цифрова технологія	Можливості застосування в екологічному оцінюванні
Сенсорні моніторингові системи	Фіксація концентрацій шкідливих речовин у ґрунті, повітрі та воді в реальному часі
Біоінформатика та моделювання мікробіоценозів	Аналіз змін у структурі мікроорганізмів під впливом токсинів або змін вологості, рН та температури
Геоінформаційні системи (GIS)	Картографування екологічно небезпечних зон з урахуванням джерел відходів та локальної біоактивності
Штучний інтелект і машинне навчання	Прогнозування ризиків деградації довкілля та автоматизований аналіз великих екологічних і мікробіологічних баз даних
Супутникові дані та дистанційне зондування Землі	Виявлення змін у рослинному покриві, вологості ґрунтів і якості води, пов'язаних із накопиченням відходів

активізації патогенних мікроорганізмів. Доведено, що органічні та біологічні методи утилізації відходів, за умови науково обґрунтованого підходу, сприяють відновленню мікроорганізмів і мінімізації екологічних ризиків.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для підвищення рівня екологічної безпеки та

задоволення інформаційних потреб основних суб'єктів здійснення екологічної оцінювання.

Перспективи подальших досліджень. У подальших наукових розвідках доцільно зосередити увагу на глибокому вивченні конкретних штамів мікроорганізмів, які здатні до біодеструкції небезпечних сполук із відходів, та створенні мікробіологічних карт забруднених територій.

Література

1. Купалова, Г., Гончаренко, Н., Андрусів, У., Олешко, Є., & Демченко, К. Екологічна модернізація виробництва в забезпеченні інноваційного розвитку промислових підприємств. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 1(60), 2025, 512–521. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.1.60.2025.4606>
2. Карбовська, Л., Мазур, Ю., Железняк, К., Козлова, А., Мельник, Б., & Скрипцов, С. Формування системи управління відходами в аграрному секторі економіки України: організаційний та фінансовий аспекти. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 5(58), 2024, 367–379. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.5.58.2024.4462>
3. Хільчевський В.К., Забокрицька М.Р., Кравчинський Р.Л. Екологічна стандартизація та запобігання впливу відходів на довкілля. К.: ВПЦ «Київський університет». 2016. 192 с.
4. Горбаль Н., Адамів М., Чумак А. Адаптування принципів циркулярної економіки до управління відходами в Україні. Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Проблеми економіки та управління». 2020; Вип. 4, № 1. С. 159-166. <https://doi.org/10.23939/semi2020.01.159>
5. Колодійчук І. А. Формування територіально збалансованих систем управління відходами: регіональний вимір : монографія. Львів : ДУ «Інститут регіональних досліджень імені М. І. Долишнього НАН України», 2020. 524 с.
6. Сафранов Т. А., Шаніна Т. П., Губанова О. Р., Приходько В. Ю. Небезпечна складова твердих побутових відходів: класифікація та проблема поводження. Зб. наук. праць V Всеукр. з'їзду екологів з міжнародною участю. Вінниця: ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. С. 27.
7. Залознова, Ю., Сердюк, О., & Петрова, І. Інтерналізація негативних зовнішніх ефектів промислового виробництва. *Financial and Credit Activity Problems of Theory and Practice*, 4(51), 2023, 368–382. <https://doi.org/10.55643/fcaptr.4.51.2023.4070>
8. Маковецька Ю. М. Поточний стан адаптації українського законодавства до європейського у сфері управління відходами. *Ефективна економіка*. 2022. № 5. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2022.5.84>
9. Михайлова Є.О., Панчева Г.М., Резніченко Г.М. Ефективні механізми поводження з твердими побутовими відходами в Україні. *Комунальне господарство міст*, 2019, том 5, випуск 151, с. 37-44. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-5-151-37-44>
10. Криштанович, М., & Силкін, О. Оцінювання стратегічних напрямів реалізації державно-приватного партнерства в царині безпечного розвитку агропромислового сектора. *Socio-Economic Relations in the Digital Society*, 1(55), 2025, 44-55. <https://doi.org/10.55643/ser.5.55.2025.587>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ЗАЛИШКОВИХ ФРАКЦІЙ З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Приходько В.Ю.

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

вул. Львівська, 15, 65016, м. Одеса

vks26@ua.fm

В статті розглянуто залишкові відходи у складі твердих побутових відходів, охарактеризований склад групи та наповнення в залежності від системи роздільного збирання. Так, до залишкових відходів відносяться не тільки традиційні залишки або відсів, а й фракції, що містяться у незначній кількості та не мають ресурсної цінності, а також залишки від сортування роздільно зібраних фракцій. Критерієм «залишковості» є не тільки вміст у загальній масі, а й можливості поводження з відходами на даному етапі становлення системи управління відходами. За умов невідсортованого потоку залишкові відходи складаються із біодеградабельних (деревина, текстиль, шкіра, кістки) неорганічних (каміння), небезпечних (засоби особистої гігієни), гуми та відсіву або змішаних відходів. З міжнародного досвіду, основним варіантом поводження із залишковими відходами є вироблення палива. Залишкові відходи мають певний енергетичний потенціал і є джерелом для виробництва альтернативних палив з відходів на заводах механіко-біологічної обробки. Показано, що у випадку налагодженої системи роздільного збирання на «суху» і «вологу» фракції, сортування вторинної сировини можливо досягнути максимальної калорійності залишкових відходів із теплою згоряння 14,3-16,4 МДж/кг, а за умов вилучення відсіву – до 21,5 МДж/кг. Проте така система роздільного збирання значно зменшує обсяги потенційної сировини із залишкових відходів: від 350-450 кг/т на заводах механіко-біологічної обробки з відновленням енергії до 130-150 кг/т за умов роздільного збирання із сортуванням. Параметри, що визначають можливість вироблення палива з відходів, також включають; морфологічний склад та кількість побутових відходів, якість окремих складових (макулатури, текстилю, пластику тощо), що визначають робочу теплоту згоряння отриманого палива.

Ключові слова: залишкові відходи, енергетичний потенціал, роздільний збір, теплота згоряння, RDF, SRF.

Resource potential of residues from municipal solid waste. Prykhodko V.

The article considers residual waste as a part of municipal solid waste, describes the composition of the group and its content depending on the separate collection system. Thus, residual waste includes not only traditional residues or miscellaneous, but also fractions contained in small quantities and having no resource value, as well as residues from sorting separately collected fractions. The criterion of 'residual' is not only the content in the total mass of waste, but also the possibilities of waste management at this stage of the waste management system development. In an unsorted flow, residual waste consists of biodegradable (wood, textiles, leather, bones), inorganic (stones), hazardous (personal care products), rubber and miscellaneous or mixed waste. According to international experience, the main option for managing residual waste is fuel production. Residual waste has a certain energy potential and is a source for the production of alternative fuels from waste at mechanical and biological treatment plants. It has been shown that in the case of an implemented system of separate collection into 'dry' and 'wet' fractions, and additional sorting of secondary raw materials, it is possible to achieve the maximum calorific value of residual waste with a calorific value of 14.3-16.4 MJ/kg, and up to 21.5 MJ/kg if miscellaneous are removed. However, such a separate collection system significantly reduces the volume of potential raw materials from residual waste: from 350-450 kg/t at mechanical and biological treatment plants with energy recovery to 130-150 kg/t under conditions of separate collection with additional sorting. The parameters that determine the possibility of producing fuel from waste also include the waste composition and quantity of municipal solid waste, the quality of individual components (waste paper, textiles, plastics, etc.) that determine the working heat of combustion of the resulting fuel. *Key words:* residual waste, energy potential, separate collection, calorific value, RDF, SRF.

Постановка проблеми. Посилення негативних наслідків прогресуючого накопичення твердих побутових відходів (ТПВ) у довкіллі вимагає, серед іншого, впровадження різних моделей використання ресурсного потенціалу окремих компонентів. Це дозволить зменшити використання первинної сировини та знизити негативний вплив на довкілля від місць видалення відходів. Морфологічний склад ТПВ охоплює широке коло відходів (біля 70 компонентів), які за речовинною ознакою можна згрупувати у такі групи: біодеградабельні відходи; вторинні матеріальні ресурси; інертні мінеральні відходи та інші (залишкові) відходи. Перехід від лінійних економічних моделей виробництва та споживання до циркулярних вимагає наближення до zero waste,

коли відходи набувають статусу вторинних ресурсів. На сьогодні такими є традиційні види вторинної сировини – макулатура, пластик, скло, метали. Започатковується виокремлення та переробка найбільшої з фракцій ТПВ – органічних відходів, які легко розкладаються. Але складність сучасного споживання супроводжується багатокомпонентним складом утворених відходів, що стає значною перешкодою для їх повторного використання, рециклінгу чи відновлення. Певною невизначеністю характеризується група залишкових відходів – як за компонентним складом, так і за можливостями використання, що й обумовлює актуальність дослідження.

Зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Розробка і запровадження ефек-

тивних систем управління ТПВ з метою запобігання екологічним наслідкам прогресуючого накопичення відходів є завданням світової спільноти. Так, серед 17 цілей сталого розвитку щонайменше 4 стосуються питання відходів. Курс на максимальне залучення відходів у виробничі цикли вимагає розробки відповідних технологій до кожної групи, в т.ч. й до залишкових відходів, що утворюються як наслідок посилення комплексності морфологічного складу сучасних ТПВ. Проблема використання ресурсного потенціалу залишкових відходів з ТПВ з урахуванням суттєвої частки в загальній масі відходів (від 10%) вимагає розробки практичних рішень, які зводяться до спалювання або захоронення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідженню складу ТПВ з позицій використання ресурсного потенціалу присвячено чимало наукових досліджень [1-4], проте залишкові відходи здебільшого залишаються поза фокусом. Це також характерно для зарубіжних досліджень з управління відходами, хоча в класифікаціях залишкові або інші відходи визначені як «miscellaneous waste» [5] та «others», або окремо «miscellaneous inorganic waste». Попри те, що бракує інформації щодо складу та кількості утворених залишкових відходів, простежується загальна тенденція щодо їх захоронення або термічної утилізації. Так, технології WTE (Waste-to-Energy) визнані перспективними у сфері управління ТПВ [6], а паливо з відходів у вигляді RDF (Refuse Derived Fuel) та SRF (Solid Recovered Fuel) відноситься до відновлюваних джерел енергії [7-9], (хоча, відповідно до Закону України «Про альтернативі джерела енергії», до цієї категорії відноситься лише біогаз – продукт анаеробної ферментації органічних відходів). Отже, **серед питань, які вимагають детальних досліджень** – характеристика залишкових відходів та їх ролі у ефективній системі управління ТПВ.

Наукова новизна та значення представленого дослідження полягають у характеристиці групи залишкових відходів та визначенні їх енергетичного потенціалу.

Викладення основного матеріалу. З позицій управління ТПВ, тобто відповідно до можливостей виокремлення та використання ресурсного потенціалу відходів, є певна група відходів, яка може бути позначена як «залишкові відходи», до складу якої входять: 1) фракції, що містяться у незначній кількості та не мають ресурсної цінності на даному етапі запровадження системи управління відходами; 2) залишки від сортування роздільно зібраних фракцій: ресурсоцінних та змішаних відходів; 3) не ідентифіковані за складом відходи, що містяться у незначній кількості (залишки, відсів).

Залишкові відходи можна розглядати у складі загального потоку ТПВ за відсутності роздільного збирання відходів, коли вся маса відходів спрямовується на захоронення на звалищах і полігонах.

В цьому випадку залишкові відходи – це, скоріше, невизначені та некласифіковані компоненти, окремий вміст яких незначний. Проте сумарний вміст неідентифікованої групи може виявитися вагомим (від 10%). Зазначимо, що за умов стихійного відбору певних ресурсоцінних фракцій або сортування змішаних відходів на спеціалізованих підприємствах з переробки відходів, вміст поняття «залишкові відходи» буде також стосуватися неідентифікованих відходів. Інша річ, коли залишкові відходи виникають при налагодженій системі роздільного збирання та сортування роздільно зібраних фракцій (рис. 1).

Залишкові відходи у складі ТПВ – це незначні за вмістом відходи, які на даному етапі розвитку систем управління відходами не можуть бути використані повторно або перероблені та/або які неможливо класифікувати у складі комплексних груп відходів (біоорганічні відходи, відходи електричного та електронного обладнання, відходи ремонту тощо). Отже, не тільки вміст у загальній масі, а й можливості поводження з відходами є критерієм «залишковості». Наприклад, серед небезпечних відходів виділяють, наприклад, батарейки та акумулятори, що містяться в незначній кількості у ТПВ, проте для них розроблений та впроваджений підхід щодо адресного збору та наступного знешкодження.

Аналіз даних з морфологічного складу ТПВ у розрізі залишкових відходів (невідсортований потік). Дослідження морфологічного складу ТПВ є основою для оцінки вмісту залишкових відходів. Враховуючи Методичні рекомендації з визначення морфологічного складу побутових відходів (2024), серед основних компонентів ТПВ оберемо ті, що можна охарактеризувати як залишкові за вмістом (табл. 1).

Як бачимо, у складі залишкових відходів є органічні та неорганічні складові, проте самі відходи – це потенційне джерело для вироблення палива з відходів.

Вироблення альтернативного палива з калорійних фракцій ТПВ. Сучасний світовий досвід у сфері сміттєспалювання заохочує спалювання залишків від сортування у вигляді RDF, а не самих відходів. Основна ідея виробництва альтернативного палива з ТПВ полягає у відборі калорійної фракції, яка немає ресурсної цінності. Це можуть бути як залишкові відходи (табл. 1), так і залишки від сортування ресурсоцінних фракцій, які не використовуються (табл. 2).

Одним з підходів щодо виокремлення калорійної фракції з ТПВ з наступним використанням як сировини для виробництва палива є комплексна переробка, зокрема, механіко-біологічна обробка (МБО). Серед завдань, пов'язаних із управлінням побутовими відходами, які визначені у Національній Стратегії управління відходами в Україні до 2030 року, є створення пілотних проектів з виробництва палива на базі об'єктів МБО.



Рис. 1. Диференціація потоку ТПВ з фокусом на залишкових відходах

Таблиця 1

Характеристика залишкових відходів (невідсортований потік)

Компонент	Вміст у ТПВ, % [1, 2, 7]			Класифікаційна ознака відходів
Деревина	1,75			Біодеградабельні
Гума	0,2	1,7	2,2	
Шкіра	0,5			
Кістки	0,1			
Каміння	6,1			Неорганічні
ЗОГ	1,4			Небезпечні
Залишки	5,4-18			Змішані

Таблиця 2

Компоненти ресурсоцінних фракцій, які не переробляються

Фракція	Компоненти, які не переробляються
Паперова	Забруднений папір, чеки, серветки та паперові рушники, вироби з переробленого паперу, які не підлягають переробці, паперові стаканчики
Текстильна	Одноразовий одяг, дрантя, забруднене в процесі використання, спідня білизна та одяг, який неможливо використати повторно
Пластикова	Пластик без маркування, з маркуванням 3 (ПВХ) або 7 (Інші), плівки («шуршик»), багатошарове пакування, забруднений їжею пластик

На заводах МБО відбувається вилучення та/або відновлення калорійної (паливної) фракції ТПВ для виробництва RDF/SRF (рис. 2). Це є основною цільовою функцією таких заводів. Вихід легкої фракції для виробництва RDF оцінюється у 350-450 кг з 1 т ТПВ [1].

Неодмінна умова отримання сировини для виробництва RDF – суха фракція залишків. Отже,

така фракція підпадає під відновлення шляхом спалювання з утилізацією отриманого тепла (R1). Як бачимо, певне розділення на «суху» і «вологу» фракцію відбувається на етапі сортування на заводі МБО. За умов відбору лише ресурсоцінних компонентів цінність залишкової маси як палива знижується через наявність вологи з харчових відходів. Водночас така маса є більш стабільною на полігоні.



Рис. 2. Диференціація потоку ТПВ на заводах МБО, що працює за технологією відновлення енергії [1]



Рис. 3. Схема матеріальних потоків відходів за умови роздільного збирання та досортування на сміттесортувальних лініях

Проте найбільш ефективна диференціація потоку ТПВ можлива за організованого роздільного збирання з відведенням органічних відходів, які легко розкладаються, із загального потоку в момент утворення (рис. 3).

Розглянемо матеріальний баланс отримання сировини з відходів за умови роздільного збирання та досортування отриманих фракцій на сміттесортувальній лінії. Припустимо, що непридатна для переробки макулатура складає 15% від загального обсягу цієї фракції у ТПВ. Багатошарове пакування – це висококалорійна фракція ТПВ, вміст якої оцінюється на рівні 0,5%. Також врахуємо приблизну структуру пластикових відходів, з яких приблизно 20% складають полімери, які не переробляються (з маркуванням «5», «6» та «7»). Склад залишкових відходів залишається відповідно до схеми на рис. 1, тобто це текстиль, деревина, гума та шкіра.

Розрахунок матеріального балансу за схемою на рис. 3 показав, що вихід висококалорійної фракції для виробництва RDF становитиме 128-143 кг на 1 т

ТПВ. Вона складатиметься щонайменше із залишків відсортованої фракції і залишкових відходів. Це є певною перевагою, порівняно із сортуванням загального потоку на МБО (рис. 2), оскільки спалювання, навіть з метою ліквідації відходів, має значний негативний вплив на довкілля.

Враховуючи вміст та теплоту згоряння залишкових відходів (табл. 3), визначимо теплоту згоряння суміші. Так, теплота згоряння суміші з наведених фракцій відходів складає 14,31-16,35 МДж/кг, що відповідає пороговому значенню у 14,4 МДж/кг, коли спалювання відходів можливе без додаткового палива. Якщо не враховувати відсів < 15мм з найнижчою теплоотою згоряння, розрахована теплота згоряння суміші становитиме 18,57-21,5 МДж/кг, а це фактично теплота згоряння біогазу. В цьому випадку суміш відходів відповідає вимогам до SRF – якісне паливо з ТПВ з теплоотою згоряння більше 15 МДж/кг. На наведені результати значно впливає морфологічний склад ТПВ та фактична теплота згоряння фракцій (з табл. 3 видно, що вона

Таблиця 3

Характеристики складових для виробництва RDF з ТПВ

Компонент	Вміст у ТПВ, % [1, 2, 7]	Вміст у сировині, %	Теплота згоряння, МДж/кг [1, 8]	Вологість, % [8]
Текстиль	3,4	18,5	15,72-16,2	20
Папір	2,1	11,4	9,49-13,4	25
Багатошарове пакування	0,5	2,7		
Гума, шкіра	2,2	12,0	25,8-33,5	5,0
Деревина	1,9	10,3	14,46-14,7	20
Пластик	1,16	6,3	24,37-33,6	-
ЗОГ	1,1	6,0	29,5*	25
Відсів < 15мм	5,5	30	4,6	20
Інші	0,5	3,0	18,14	8,0

* розраховано автором за осередненим складом матеріалів у складі підгузки без врахування вологи

варіює в залежності від складу компоненту та джерела отримання даних).

Як бачимо з результатів, роздільний збір з обов'язковим виокремленням вологих відходів є важливою умовою для виробництва палива із залишків.

Попри те, що за розрахунками [9] в Україні є потенціал для щорічного виробництва 1,5-2,0 млн. т RDF/SRF з теплою згоряння 15,0-17,0 МДж/кг, перспективи його використання на цементних заводах ускладнюються через певні фактори. Так, є вимоги щодо палива, яке приймає цементний завод, а також питання логістики і вартості приймання. З іншого боку, використання RDF/SRF є механізмом зменшення викидів парникових газів в цементній промисловості. Реальним механізмом використання RDF в Україні може стати паливом для теплової електростанції (на прикладі м. Хмельницький). Якість RDF може погіршуватися через вологість (якщо не сортувати на «суху» і «вологу» фракції) та наявність небезпечних компонентів.

Головні висновки. Отже, група залишкових відходів є багатоконпонентною, але вагомою у загальній масі ТПВ (10-18%), а її наповнення

залежить від впровадження системи управління ТПВ в громаді. До факторів, які визначатимуть кількість та склад залишкових відходів, належать організація роздільного збирання, наявність сортування та стан використання вторинної сировини. На сьогодні основним способом поводження із залишковими відходами є їх захоронення. Проте доведено, що ці відходи мають енергетичний потенціал і можуть бути залучені в технології WTE. Показано, що за умов роздільного збирання, особливо з виокремленням вологих відходів, теплотворна здатність палива із залишкових відходів підвищується до 21,5 МДж/кг (порівняно з вихідними ТПВ, що мають теплоту згоряння 4-7 МДж/кг). За таких умов також зменшується і кількість спалюваних залишків, а це означає зменшення впливу на довкілля від спалювання.

Перспективи використання результатів дослідження. Наведені результати щодо ефективного використання ресурсного потенціалу залишкових відходів свідчать про необхідність запровадження ефективних моделей управління ТПВ на початку життєвого циклу відходів.

Література

1. Практичні аспекти управління відходами в Україні : посібник / Барінов М.О. та ін. Київ, 2021. 118 с.
2. Ілляш О.Є., Голік Ю.С., Чепурко Ю.В., Серга Т.М. Аналіз компонентного складу побутових відходів різних міст України. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* : кол. мон. / за ред. проф. Мальованого М. С. Київ, 2023. С. 106-119.
3. Сафранов Т.А., Приходько В.Ю., Яновський Д.Ю. Ресурсоцінний потенціал потоку твердих побутових відходів Одеської області. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2023. № 32. С. 144-156.
4. Голік Ю.С., Крот О.П., Серга Т.М. Тверді побутові відходи як резерв енергетичного потенціалу міста. *Екологія. Довкілля. Енергозбереження*. 2023 : кол. мон., Полтава, 2023. С. 37-47.
5. Lamborn J. Characterisation of municipal solid waste composition into model inputs. *Hydro-Physico-Mechanics of Landfills: Third International Workshop*, 2009. URL: <https://www.researchgate.net/publication/228507204> (Last accessed: 15.07.2025)
6. Hefa Cheng, Yuanan Hu. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101. Issue 11. PP. 3816-3824. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852410000970> (Last accessed: 22.07.2025)
7. Veolia. Модульний підхід до формування індивідуальної системи поводження з відходами. *Waste Management – 2019: Презент. доп.* URL: <https://drive.google.com/file/d/1XaEsjcz1MT1iN4nt6B46IJECEGr5OKPW/view?usp=sharing> (дата звернення 20.06.2025)

8. Склярєнко Є.В. Методика визначення теплоти згоряння при виробництві палив з твердих побутових відходів із наперед заданими характеристиками. *SWorldJournal*. 2023. Issue 20. Part. 1. PP. 11-20. URL: <https://www.sworldjournal.com/index.php/swj/article/view/swj20-01-008> дата звернення: 22.07.2025)
9. Гапонич Л.С., Голенко І.Л., Топал О.І. Перспективи використання *SRF* та *RDF* на цементних заводах України. *Екологічні науки*. 2020. № 3(30). С. 92-97.
10. Preparation of Refuse-Derived Fuels (RDF) for use in the Cement Industry in Turkey: prepared by Jan Reichenbach, Laura Theophil. 2021. 57 p.

Дата першого надходження рукопису до видання: 23.07.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 25.08.2025

Дата публікації:

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Артюшин Леонід Михайлович (Київ) – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут авіації;

Афанасьєв Сергій Олександрович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, академік Національної академії наук України, головний науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем, Інститут гідробіології Національної академії наук України;

Барбашев Сергій Вікторович (Одеса) – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри атомних електростанцій, Національний університет «Одеська політехніка»;

Безсонний Віталій Леонідович (Харків) – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри готельного, ресторанного бізнесу і крафтових технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця;

Бендюг Владислав Іванович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри штучного інтелекту, Навчально-науковий інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Бєлоконь Каріна Володимирівна (Запоріжжя) – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи, Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Запорізький національний університет;

Бєлоконь Каріна Володимирівна (Запоріжжя) – кандидат технічних наук, доцент, заступник директора з наукової роботи, Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Запорізький національний університет;

Бойко Олександр Валерійович (Київ) – молодший науковий співробітник відділу мінеральної сировини ядерної енергетики, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»;

Бойчук Василь Богданович (Івано-Франківськ) – аспірант кафедри біології та екології, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Бондар Олександр Іванович (Київ) – доктор біологічних наук, академік Національної академії аграрних наук, в.о. директора, Інститут екологічного відновлення та розвитку України;

Бондарчук Василь Миколайович – старший викладач кафедри робототехніки, електроенергетики та автоматизації імені професора Б.Б. Самооткіна, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Борисовська Олена Олександрівна (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент, завідувачка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Босюк Альона Сергіївна (Харків) – PhD, старший викладач кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Бурко Вадим Анатолійович (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент кафедри промислових теплоенергетичних установок і теплопостачання, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»;

Валерко Руслана Анатоліївна – доктор сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Василенко Ольга Миколаївна (Житомир) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Владимиров Руслан Валерійович (Харків) – аспірант кафедри фундаментальної та прикладної геології, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна;

Власов Ілля Григорович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Вовк Вадим Миколайович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Вовкодав Галина Миколаївна (Одеса) – кандидат хімічних наук, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Войтків Петро Степанович (Львів) – кандидат географічних наук, доцент кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Волошин В'ячеслав Степанович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор кафедри промислових теплоенергетичних установок і теплопостачання, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет»;

Герасимчук Людмила Олександрівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Герасимчук Олена Леонтіївна (Житомир) – кандидат педагогічних наук, доцент, завідувач кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Гетта Анастасія Андріївна (Дніпро) – аспірантка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Інститут природокористування Національного технічного університету Дніпровська політехніка;

Гирич Анатолій Михайлович (Халле, Німеччина) – кандидат біологічних наук, заступник директора з наукової роботи, компанія Номад Байосайенс

Гнєзділова Вікторія Ігорівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Гончарук Віталій Володимирович (Умань) – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини;

Горішний Максим Леонідович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Грабко Наталія Вікторівна (Одеса) – старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Грегірчак Наталія Миколаївна (Київ) – кандидат технічних наук, декан факультету біотехнології та екологічного контролю, Національний університет харчових технологій.

Григорчук Інна Дмитрівна (Кам'янець-Подільський) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Дерман Вадим Андрійович (Київ) – науковий співробітник відділу мінеральної сировини ядерної енергетики, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»;

Дерюгін Олег Валентинович (Дніпро) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Дмитренко Тетяна Володимирівна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Дрозд Олена Миколаївна (Харків) – кандидат сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Дядін Дмитро Володимирович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Єрмаков Юрій Юрійович (Харків) – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Єрух Микола Миколайович (Дніпро) – директор, ННК «Акваріум», асистент кафедри загальної біології та водних біоресурсів, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара;

Іваненко Максим Костянтинівич (Запоріжжя) – аспірант кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Іванов Євген Анатолійович (Львів) – доктор географічних наук, професор, завідувач кафедри конструктивної географії і картографії, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Іванюк Руслан Олександрович (Житомир) – аспірант кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Кагукіна Анастасія Максимівна (Житомир) – доктор філософії з екології, асистент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Кірейцева Ганна Вікторівна (Житомир) – доцент, кандидат економічних наук, докторант, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Клепо Алла Володимирівна (Київ) – доктор біологічних наук, старший науковий співробітник, завідувач кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Клименко Нікіта Андрійович (Веленє, Словенія) – студент, Факультет охорони довкілля;

Коваленко Григорій Дмитрович (Харків) – доктор фізико-математичних наук, професор, директор, Інститут фізики високих енергій і ядерної фізики, Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України;

Коваленко Юрій Леонідович (Харків) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Ковров Олександр Станіславович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор кафедри екології та захисту навколишнього середовища, Інститут природокористування Національного технічного університету Дніпровська політехніка;

Кожемякін Геннадій Борисович (Запоріжжя) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні Запорізького національного університету;

Козлов Владислав Володимирович (Полтава) – аспірант, Навчально-науковий інститут нафти і газу Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Колісник Алла Вікторівна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Колодій Валентина Анатоліївна (Кам'янець-Подільський) – кандидат біологічних наук, доцент, в.о. завідувача кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Коробчук Людмила Іванівна (Луцьк) – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри екології та агрономії, Луцький національний технічний університет;

Кочанов Едуард Олексійович (Харків) – кандидат військових наук, доцент, доцент кафедри екологічного моніторингу і заповідної справи, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна;

Крайнюков Олексій Миколайович (Харків) – доктор географічних наук, професор, професор кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна;

Курбет Тетяна Володимирівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Лемешко Владислав Вікторович (Умань) – аспірант кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет;

Ліненко Євген Олександрович (Харків) – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Літвак Ольга Анатоліївна (Миколаїв) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова;

Ліфер Валентин Євгенович (Харків) – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Лук'янова Віталіна Віталіївна (Київ) – кандидат хімічних наук, доцент, старший науковий співробітник відділу ядерно-фізичних технологій, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»;

Любинський Олександр Іванович (Кам'янець-Подільський) – доктор сільськогосподарських наук, професор, професор кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Любінська Людмила Григорівна (Кам'янець-Подільський) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Маджд Світлана Михайлівна (Київ) – доктор технічних наук, професор кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Мандебура Святослав Васильович (Умань) – викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини;

Мантурова Оксана Василівна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем, Інститут гідробіології Національної академії наук України;

Маренков Олег Миколайович (Дніпро) – кандидат біологічних наук, проректор з наукової роботи, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара;

Машков Олег Альбертович (Київ) – доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут екологічного відновлення та розвитку України;

Мельник-Шамрай Вікторія Вікторівна (Житомир) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Москальов Максим Олексійович (Дніпро) – здобувач PhD спеціальності 183 Технології захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Муха Роман Богданович (Київ) – аспірант кафедри біології та екології, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Некос Алла Наумівна (Харків) – доктор географічних наук, професор, професор кафедри екологічного моніторингу і заповідної справи, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна;

Нечипоренко Дмитро Ігорович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Ничик Оксана Василівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Нікітіна Ольга Володимирівна (Умань) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Уманський національний університет;

Новожилова Тетяна Борисівна (Харків) – доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Пакуляк Андрій Юрійович (Кам'янець-Подільський) – аспірант кафедри біології та екології, Кам'янець-Подільський національний університет імені Івана Огієнка;

Панас Наталія Євгенівна (Львів) – кандидат біологічних наук, доцент, кандидат біологічних наук, доцент кафедри сталого природокористування та захисту довкілля, Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького;

Парахненко Владислав Геннадійович (Умань) – доктор філософії з наук про Землю, викладач кафедри хімії та екології, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини;

Підвисоцький Віктор Тодосійович (Житомир) – доктор геологічних наук, професор кафедри гірничих технологій та будівництва імені Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка»;

Пригула Наталія Михайлівна (Запоріжжя) – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри загальної та прикладної екології і зоології, Запорізький національний університет;

Приходько Вероніка Юріївна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Проненко Максим Олексійович (Харків) – аспірант кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна;

Прутцьков Дмитро Вододимирович (Запоріжжя) – доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні Запорізького національного університету;

Радомська Маргарита Мирославівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Державний університет «Київський авіаційний інститут»;

Різничук Надія Іванівна (Івано-Франківськ) – кандидат біологічних наук, доцент кафедри біології та екології, Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;

Романчук Марина Євгенівна (Одеса) – кандидат географічних наук, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Румянцев Владислав Ростиславович (Запоріжжя) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, Інженерний навчально-науковий інститут імені Ю.М. Потебні Запорізького національного університету;

Сакун Антоніна Олегівна (Харків) – доктор філософії, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Салавор Оксана Мирославівна (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Самойленко Наталія Миколаївна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Середа Тетяна Миколаївна (Київ) – кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник відділу іхтіології та гідробіології річкових систем, Інститут гідробіології Національної академії наук України;

Сорочинська Олена Леонідівна (Київ) – кандидат історичних наук, доцент, в. о. завідувача кафедри екології та безпеки життєдіяльності, Державний університет інфраструктури та технологій;

Степова Олена Валеріївна (Полтава) – доктор технічних наук, професор, Член-кореспондент Інженерної академії України, проректор з наукової роботи, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Титаренко Андрій Ігорович (Харків) – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Тихомирова Тетяна Сергіївна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Туцький Данило Глібович (Київ) – молодший науковий співробітник відділу ядерно-фізичних технологій, Державна установа «Інститут геохімії навколишнього середовища Національної академії наук України»;

Тягній Людмила Михайлівна (Полтава) – аспірант кафедри екології та природокористування, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Філенко Олеся Миколаївна (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Хабарова Ганна Володимирівна (Харків) – кандидат технічних наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник, завідувач аспірантури, Науково-дослідна установа «Український науково-дослідний інститут екологічних проблем»;

Хамдош Іскандер Набханович (Житомир) – ліцеїст, Відокремлений підрозділ «Науковий ліцей» Державного університету «Житомирська політехніка»;

Хандогіна Ольга Вадимівна (Харків) – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова;

Харченко Вячеслав Валерійович (Київ) – кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Хом'як Іван Владиславович (Житомир) – доктор біологічних наук, доцент кафедри екології та географії, Житомирський державний університет імені Івана Франка;

Циганенко-Дзюбенко Ілля Юрійович (Житомир) – доктор філософії, доцент кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Цопа Віталій Андрійович (Київ) – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри менеджменту і економіки, Міжнародний інститут менеджменту;

Чеберячко Лідія Миколаївна – аспірантка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Чеберячко Юрій Іванович (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», професор кафедри безпеки праці та охорони довкілля, ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»;

Чернякова Оксана Іванівна (Одеса) – старший викладач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Чікірякін Кирило Віталійович (Харків) – аспірант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Чугай Ангеліна Володимирівна (Одеса) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Шамрай Володимир Ігорович (Житомир) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничих технологій та будівництва імені професора Бакка М.Т., Державний університет «Житомирська політехніка»;

Шаповалов Євгеній Борисович (Київ) – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Шапочка Максим Олександрович (Одеса) – аспірант кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова;

Шарий Григорій Іванович (Полтава) – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Навчально-науковий інститут архітектури, будівництва та землеустрою Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

Шевчук Лариса Миколаївна (Житомир) – доктор біологічних наук, професор, професор кафедри наук про Землю, Державний університет «Житомирська політехніка»;

Шестопалов Олексій Валерійович (Харків) – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Шкоп Андрій Олександрович (Харків) – кандидат технічних наук, докторант кафедри хімічної техніки та промислової екології, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»;

Шмалій Юліан Юрійович (Львів) – студент II курсу магістратури географічного факультету, Львівський національний університет імені Івана Франка;

Якименко Ігор Леонідович (Київ) – доктор біологічних наук, професор, завідувач кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій;

Яковишина Тетяна Федорівна (Дніпро) – доктор технічних наук, професор, професор кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»;

Яковлєв Валерій Володимирович (Харків) – доктор геологічних наук, доцент, професор кафедри інженерної екології міст, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, професор кафедри фундаментальної і прикладної геології, Харківський державний університет імені В.Н. Каразіна, головний гідрогеолог, ТОВ «Лабораторія якості води «ПЛАЯ»;

Яненко Владислав Сергійович (Київ) – аспірант кафедри загальної екології, радіобіології та безпеки життєдіяльності, Національний університет біоресурсів і природокористування України;

Яцемірська Наталія Петрівна (Кам'янець-Подільський) – заступник директора, начальник відділу рекреації та еколого-освітньої роботи, Національний природний парк «Подільські Товтри».

НОТАТКИ

ЕКОЛОГІЧНІ НАУКИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

4(61)

- *Інноваційні технології у сфері захисту довкілля*
- *Теоретична екологія*
- *Агроекологія*
- *Радіоекологія*
- *Екологічна безпека*
- *Екологічний моніторинг*
- *Екологія виробництва*
- *Екологія водних ресурсів*
- *Екологічні наслідки воєнних дій*
- *Екологія і кліматичні зміни*
- *Екологія і демографія*
- *Зміна клімату*
- *Загальні проблеми екологічної безпеки*
- *Питання екологічного управління*
- *Питання сталого розвитку*
- *Збереження біологічного та ландшафтного різноманіття*
- *Управління відходами*

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 28.04.2025. Формат 64х84/8.

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