ISSN 2411-4049 (print)
ISSN 2616-2121 (online)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет
будівництва і архітектури

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут телекомунікацій
і глобального інформаційного простору

Екологічна безпека та природокористування

Environmental safety and natural resources

Збірник наукових праць

ВИПУСК 56

2025

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Національна академія наук України
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору

Ministry of Education and Science of Ukraine
Kyiv National University of Construction and Architecture

National Academy of Sciences of Ukraine
Institute of Telecommunications and Global Information Space

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Збірник наукових праць

Випуск 4 (56), жовтень – грудень 2025 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 4 (56), October – December 2025

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2025

KYIV 2025

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР: **О.М. ТРОФИМЧУК,** д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАНУ

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА: **О.С. ВОЛОШКІНА,** д-р техн. наук, проф.
Н. КАСАГЛІ, професор, Італія
Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ, PhD, Австралія

ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР: **Ю.І. КАЛЮХ,** д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В.О. ВАСЯНІН, д-р техн. наук
О.А. ВЛАДИМИРСЬКИЙ, д-р техн. наук
О.М. ГУНЧЕНКО, канд. техн. наук
С.О. ДОВГИЙ, д-р фіз.-мат. наук, проф., академік НАНУ
В.Б. ЄГОРОВ, д-р техн. наук
С.В. ЗАЙЦЕВ, д-р техн. наук, проф.
О.В. КОПІЙКА, д-р техн. наук, проф.
Г.М. КОЧЕТОВ, д-р техн. наук, проф.
Т.І. КРИВОМАЗ, д-р техн. наук, проф.
О.Є. КРУЖИЛКО, д-р техн. наук
О.Г. ЛЕБІДЬ, д-р техн. наук
М.Л. МИРОНЦОВ, д-р техн. наук
В.О. МІЛЕЙКОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.
Т.О. НЕГРІЙ, канд. техн. наук
О.В. НЕСТЕРЕНКО, д-р техн. наук
С.В. СУКАЧ, д-р техн. наук, проф.
О.М. ТЕРЕНТЬЄВ, д-р техн. наук
О.М. ТИХЕНКО, д-р техн. наук, проф.
Т.М. ТКАЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.
В.М. ТРИСНЮК, д-р техн. наук
В.О. УСТИМЕНКО, д-р фіз.-мат. наук, проф.
В.Ф. ФРОЛОВ, д-р техн. наук, проф.
Д.І. ЧЕРНІЙ, д-р техн. наук
С.Й. ШАМАНСЬКИЙ, д-р техн. наук
Є.О. ЯКОВЛЄВ, д-р техн. наук

МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА

М.-Й. ВАЛЕРІ, проф., Польща
М. ЖЕЛЕЗНЯК, канд. техн. наук, проф., Фукусіма, Японія
Д. МІНТЕР, проф., Великобританія
А. МІШО, дослідник, Франція
М.Г. МУСТАФАЄВ, д-р с.-г. наук, професор, Азербайджан
Я. ПЕКУТІН, проф., Польща
ПІНГ ЛУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 19 від 19.12.2025)

Збірник наукових праць включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія "Б"), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук та доктора філософії за напрямом "технічні науки" за спеціальностями 101, 183 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 № 886), 263 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 15.11.2022 № 1026), 122 (Наказ Міністерства освіти і науки України від 20.12.2023 № 1543)

ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА

- Екологічна безпека та основи природокористування
- Цивільна безпека
- Інформаційні технології та математичне моделювання
- Дискусійні повідомлення

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ
03186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Телефони: (044) 245-87-97, (044) 524-22-62
E-mail: e.voloshki@gmail.com
Електронна версія збірника в Інтернеті http://www.es-journal.in.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.
Ідентифікатор R30-2590 в реєстрі суб'єктів в сфері друкованих медіа (Рішення № 223, Протокол № 4 від 01.02.2024 р. Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення).

Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

Цопа В.А., Негрій Т.О., Дерюгін О.В., Чеберячко Л.М. Директиви ЄС з управління відходами та запровадження їх в Україні в рамках угоди про асоціацію…….. 5

Шумбар К.В., Кравченко М.В., Василенко Л.О., Ткаченко Т.М., Волошкіна О.С., Щербак А.І. Комплексна емергійна оцінка екосистемних послуг і економічної ефективності міських зелених конструкцій……. 20

Кирієнко П.Г., Мельников А.Ю., Бетін О.В., Мсаллам К.П. Спалювання пелет з відходів сільського господарства…….. 35

Гамоцький Р.О. Інтеграція екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим будівлям…… 43

Poroshenko S., Khokhotva O. Advanced resource-efficient technologies for Chromium (VI) removal from industrial wastewater: analysis and reuse potential 57

Редько А. Екоенергетичний потенціал відпрацьованих кар'єрів і ризики його використання…….. 69

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Беспалова А., Книш О., Дашковська О., Файзуліна О. Використання ауралізації як перспективного засобу боротьби з шумом на будівельному майданчику……. 82

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Турчинов О.В., Худинцев М.М., Клименков О.А., Хоменко О.А., Палажченко І.Л. Мережева та економічна складова фінансових індексів кібербезпеки……. 102

Фадейчев С.В., Трофимчук О.М., Триснюк В.М. Синергія квантових обчислень та федеративного навчання в інформаційних технологіях виявлення прихованих цільових груп…….. 114

Щипцов О. Проблемні питання цунамі в Чорному морі…….. 123

Нестеренко О.В., Яцук П.П. ШІ (не) проти ШІ……. 134

Ходневич Я., **Корбутяк В.** Прогнозування коефіцієнта гідравлічного опору за допомогою алгоритму ансамблевої нейронної мережі……. 154

Насєдкін Є.І., Гаврилюк Р.Б., Федосеєнков С.Г., Невєрова С.І., Стадніченко С.М., Земський Д.В. Деякі результати досліджень річкової зависі Дніпра та Дунаю…….. 174

Шолохов О.В., Дякон Д.В. Застосування марковської моделі у інформаційній технології формування локальної соціально-економічної системи…… 186

ДО ВІДОМА АВТОРІВ……. 201

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Tsopa V., Nehrii T., Deryugin O., Cheberyachko L. EU directives on waste management and their implementation in Ukraine within the framework of the association agreement……... 5

Shumbar K., Kravchenko M., Vasylenko L., Tkachenko T., Voloshkina O., Shcherbak A. Comprehensive emergent assessment of ecosystem services and economic efficiency of urban green structures……... 20

Kyriienko P., Melnykov A., Betin O., Msallam K. Combustion of pellets from agricultural waste……. 35

Hamotskyi R. Integration of environmental safety into mechanisms for combating energy threats to residential buildings…… 43

Poroshenko S., Khokhotva O. Advanced resource-efficient technologies for Chromium (VI) removal from industrial wastewater: analysis and reuse potential…… 57

Redko A. Eco-energy potential of exploded quarries and risks of its use…... 69

CIVIL SAFETY

Bespalova A., Knysh A., Dashkovskaya O., Faizulyna O. Using auralization as a promising means of controlling noise on a construction site... 82

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Turchynov O., Khudyntsev M., Klymenkov O., Khomenko O., Palazhchenko I. Network and economic component of financial cybersecurity indices……... 102

Fadeichev S., Trofymchuk O., Trysnyuk V. Synergy of quantum computing and federated learning in information technology detection of hidden target groups……. 114

Shyptsov O. Ttsunami issues in the Black Sea……. 123

Nesterenko O., Yatsuk P. AI (not) against AI……. 134

Khodnevych Ya., Korbutiak V. Prediction of hydraulic resistance coefficient using an ensemble neural network algorithm……. 154

Nasiedkin Ye., Havryliuk R., Fedoseienkov S., Nevierova S., Stadnichenko S., Zemskyi D. Some results of research on river suspended sediments of the Dnipro and the Danube…….. 174

Sholokhov O., Diakon D. Application of the markov model in information technology of the formation of the local socio-economic system…… 186

INFORMATION FOR AUTHORS…… 201

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 551.583:339.5

Vitaliy Tsopa[1]**,** Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 ***e-mail:*** dr.tsopav@gmail.com

Tetiana Nehrii[2]**,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4239-3178 ***e-mail:*** tetiana.nehrii@gmail.com

Oleg Deryugin[3]**,** Candidate of Technical Science, Associate Professor
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2456-7664 ***e-mail:*** deryugin_o@ukr.net

Lydia Cheberyachko[3]**,** postgraduate
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-2685-7809 ***e-mail:*** cheberiachko.lm@nmu.one

[1] International Management Institute, Kyiv, Ukraine
[2] Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
[3] Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

EU DIRECTIVES ON WASTE MANAGEMENT AND THEIR IMPLEMENTATION IN UKRAINE WITHIN THE FRAMEWORK OF THE ASSOCIATION AGREEMENT

Abstract. Relevance. *The relevance of the study stems from the need to analyze the requirements regarding industrial pollution in the Association Agreement between Ukraine and the EU, particularly concerning the approximation of national legislation to EU environmental law and policy.*
Objective*. The aim of the study is to summarize the requirements of EU waste management directives and to define the implementation obligations within the framework of the Association Agreement.*
Materials and methods. *To achieve the stated objective, two key methods were applied: the comparative legal method and the systems approach. These were used to compare the provisions of national legislation with those of EU directives and to identify interrelations among the various normative requirements.*
Results. *The core of the European Union's legal framework on waste management is the Waste Framework Directive, which establishes fundamental principles such as the five-step waste hierarchy, extended producer responsibility (EPR), and end-of-waste criteria. This framework is complemented by a set of specialized directives and regulations that set ambitious, legally binding targets for specific waste streams, including packaging, WEEE (waste electrical and electronic equipment), batteries, and landfilling. Key challenges for aligning national legislation with EU directives include attracting investment in infrastructure (especially for meeting the requirements of the Landfill Directive), the practical implementation of EPR systems, and the constant need to keep pace with the evolving EU legislative landscape. This necessitates a shift in the mindset of industry and businesses from mere compliance to proactive engagement – developing EPR strategies, investing in cleaner production technologies, and anticipating future EU requirements (such as the new Batteries Regulation) to maintain market access and competitiveness.*

© В.А. Цопа, Т.О. Негрій, О.В. Дерюгін, Л.М. Чеберячко, 2025

Scientific novelty. *The scientific contribution lies in summarizing the systemic challenges of implementing national waste management legislation in line with the requirements of EU directives.*
Practical value. *The study identifies the institutional support needed to transform industrial and production practices toward sustainable development and efficient resource use.*
Keywords: *directive, agreement, requirements, legislation, waste.*

В.А. Цопа[1], Т.О. Негрій[2], О.В. Дерюгін[3], Л.М. Чеберячко[3]

[1] Міжнародний інститут менеджменту, м. Київ, Україна
[2] Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна
[3] Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", м. Дніпро, Україна

ДИРЕКТИВИ ЄС З УПРАВЛІННЯ ВІДХОДАМИ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ ЇХ В УКРАЇНІ В РАМКАХ УГОДИ ПРО АСОЦІАЦІЮ

Анотація. Актуальність *пов'язана з необхідністю аналізу вимог щодо промислового забруднення в Угоді про асоціацію між Україною та ЄС, щодо наближення національного законодавства до права та політики ЄС у сфері охорони навколишнього середовища.*
Мета *полягає в узагальненні вимог директив ЄС з управління відходами та формування вимог до запровадження в рамках угоди про асоціацію.*
Методи. *Для досягнення поставленої мети використовуються два методи: порівняльно-правовий і системний, які застосовували для зіставлення норм вітчизняного законодавства та директив ЄС та встановлення зв'язків між різними вимогами нормативних документів.*
Результати. *В основі Законодавства Європейського Союзу у сфері управління відходами лежить Рамкова директива про відходи, яка встановлює фундаментальні принципи, такі як п'ятиступенева ієрархія, розширена відповідальність виробника та критерії припинення статусу відходів. Рамкова директива про відходи доповнюється низкою спеціалізованих директив та регламентів, що встановлюють амбітні, юридично обов'язкові цілі для конкретних відходів, зокрема для упаковки, ВЕЕО, батарей та захоронення. Ключовими викликами для імплементації національного законодавства до вимог директив ЄС залишаються залучення інвестицій в інфраструктуру (особливо для виконання вимог Директиви про захоронення), практичне впровадження систем РВВ та необхідність постійно наздоганяти законодавство ЄС, що швидко розвивається. Це потребує від промисловості та бізнесу переходу від ментальності простого дотримання вимог до проактивних дій, тобто розробки стратегії для РВВ, інвестування в чистіші технології виробництва та передбачення майбутніх вимог ЄС (як-от Регламент про батареї), щоб зберегти доступ до ринку та конкурентоспроможність.*
Наукова новизна *полягає в узагальненні наскрізних викликів імплементації національного законодавства в сфері управління відходами з вимогами Директив ЄС.*
Практична цінність *полягає у визначенні інституційної підтримки для трансформації промисловості та виробничих практик в напрямку сталого розвитку та ефективного використання ресурсів.*
Ключові слова: *Директива, Угода, вимоги, законодавство, відходи.*
https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.5-19

Вступ

Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони (далі – Угода), підписана у два етапи в березні та червні 2014 року та введена в дію в повному обсязі 1 вересня 2017 року, є найважливішим міжнародно-правовим документом в історії України [1]. Вона замінила попередню Угоду про партнерство та співробітництво, ознаменувавши перехід від простої співпраці до "політичної асоціації та економічної інтеграції". Масштаб Угоди, що налічує понад 1000 сторінок та більше 40 додатків, свідчить про глибину та всеосяжний характер інтеграційних процесів [2].

Ратифікація Угоди Верховною Радою України Законом № 1678-VII від 16 вересня 2014 року та Європейським Парламентом надала її зобов'язанням статусу національного та міжнародного права. Офіційна публікація Закону про ратифікацію в таких виданнях, як "Відомості Верховної Ради України" та "Офіційний вісник України", формалізувала його правовий статус в українській правовій системі, зробивши його положення обов'язковими до виконання на території держави. Розділ Угоди "Навколишнє природне середовище" конкретно зобов'язує сторони "розвивати та зміцнювати співробітництво з питань охорони довкілля", сприяючи реалізації довгострокових цілей сталого розвитку та "зеленої" економіки.

Однак ядром юридичного зобов'язання щодо зміни законодавства є Додаток 30 Угоди, який є не просто рекомендацією, а юридично обов'язковим переліком актів законодавства ЄС (*acquis communautaire*), які Україна зобов'язалася імплементувати у свою національну правову систему [3, 4]. Цей додаток охоплює широкий спектр екологічних секторів, включаючи якість повітря та води, промислове забруднення, охорону природи та, що є ключовим, управління відходами. Загалом він містить 26 директив та три регламенти, які підлягають імплементації, що свідчить про комплексний характер екологічної реформи. Звідси виникає актуальна задача з узагальнення вимог директив ЄС з управління відходами та формування вимог до запровадження в рамках угоди про асоціацію.

Аналіз літературних джерел

У роботі [5] авторами за підсумком проведеного аналізу щодо гармонізації українського законодавства з положеннями рамкової Директиви 2006/21/ЄС сформований перелік завдань, які потребують першочергового вирішення. Зокрема, це приведення у відповідність термінології та визначення, беручи до уваги термінологічний апарат Директив 2008/98/ЄС та 1999/31/ЄС з метою уникнення дублювання. Також, розробити порядок віднесення відходів до різних категорій небезпеки та ввести систему дозволів на функціонування відходів. Разом з тим, в публікації, крім загального аналізу, не визначено, що виконано і яким чином буде виконано з урахуванням можливостей вітчизняних організацій.

Автори роботи [6] пропонують при виборі стратегії в галузі поводження з відходами побудувати ієрархію пріоритетів запобіжних заходів для зниження загрози екологічного забруднення довкілля. Так, до найпершого запобіжного заходу слід віднести розробку і запровадження в Україні інструктивного

документа методології щодо віднесення відходів до певної класифікаційної категорії за токсичністю з урахуванням сучасних рекомендацій ВООЗ і вказівок Директив. Наступним важливим кроком є створення системи моніторингу забруднення навколишнього природного середовища (ґрунт, вода, повітря) на всіх етапах поводження з відходами (перевезення, складування, видалення, утилізація). Разом з тим, при визначенні пріоритетів, автори використовують оцінку ризиків, що являється дієвим процесом для прийняття управлінських рішень.

У дослідженні [7] автор провів порівняльний аналіз українського законодавства із вимогами Директиви 2008/98/ЄС про відходи, Директиви 2012/19/ЄС про відходи електричного та електронного обладнання, Директиви 1999/31/ЄС про захоронення відходів та Директиви 2006/66/ЄС про батареї та акумулятори, що дозволило йому розробити рекомендації для усунення невідповідностей з сучасними європейськими стандартами. Автор запропонував введення принципу розширеної відповідальності виробників, який змушує взяти відповідальність за весь життєвий цикл продукції, включно зі стадією після споживання, що упорядковує сферу відходів електричного та електронного обладнання.

У праці [8] здійснено аналіз законів та підзаконних актів, що були прийняті Україною на виконання положень Угоди про асоціацію у сфері охорони довкілля. Розроблено план процесу подальшої адаптації права ЄС у сфері охорони довкілля України в рамках Угоди про асоціацію, який будується на основі вимог сталого розвитку.

Робота [9] присвячена проблемам імплементації Закону України «Про управління відходами», що запустив реформу управління відходами в Україні, яка визначила позитивний момент із запровадження класифікації різних груп відходів та практик поводження з ними. Разом з тим, виникає необхідність вдосконалення порядку класифікації відходів та класифікації-ідентифікації поводження з відходами. Зазначається про необхідність розробки процесів, що регулює відносини, пов'язані із запобіганням утворенню відходів; управлінням відходами, що утворюються в Україні, а також з управлінням відходами, що перевозяться через територію України, вивозяться за її межі та ввозяться в Україну з метою відновлення, у тому числі рециклінгу.

Автори [10] дослідили перспективи розвитку законодавства України щодо поводження з відходами в процесі адаптації до вимог Європейського Союзу та зазначили необхідність уточнення деяких термінів та визначень, що дозволять краще розуміти відповідні процеси забруднення довкілля. Зокрема представивши, що довкілля – це система, яка існує самостійно і водночас безпосередньо впливає на життєдіяльність людства, виникає потреба у визначенні впливу відходів не тільки на навколишнє середовище, а й на здоров’я людини.

Згідно з положеннями роботи [11] стан адаптації законодавства України до права ЄС відзначається високим рівнем прогресивності, однак ще далекий від повної відповідності. Існує політична воля і нормативна база, проте потрібна глибша імплементація, інституційна стійкість та контроль за виконанням адаптованих до права ЄС положень законодавства України.

У науковій праці [12] автор розглянув розвиток законодавчої бази України у сфері управління відходами через призму гармонізації з вимогами європейського права. Це дозволило зробити висновки щодо виявлених

невідповідностей у національному законодавстві. Зокрема, необхідність впровадження принципу розширеної відповідальності виробників, який покладає на виробників відповідальність за весь життєвий цикл продукції, включно зі стадією після споживання; потреба в ухваленні спеціалізованих законів для повної імплементації окремих директив ЄС. Також, невідповідність у сфері відходів електричного та електронного обладнання, батарей та акумуляторів, що потребує подальшого вдосконалення національного законодавства з правом ЄС, які базуються на розробці законів «Про відходи електричного та електронного обладнання» та «Про батареї та акумулятори».

З аналізу останніх публікацій можна зробити висновок, що в Україні активно працюють над адаптацією національного законодавства до європейських стандартів. Важливим кроком стало прийняття Закону України "Про управління відходами", який передбачає визначення різних груп відходів та практик поводження з ними, встановлення ієрархії заходів з управління відходами, що дублює підходи ЄС, запровадження системи розширеної відповідальності виробника. Незважаючи на значний прогрес, імплементація європейського законодавства у сфері управління відходами в Україні все ще стикається з викликами, такими як необхідність подальшої розробки підзаконних актів, залучення інвестицій та створення необхідної інфраструктури, що потребує подальшого аналізу вимог директив ЄС з управління відходами для пошуку відповідних шляхів їх реалізації.

Мета роботи

Мета роботи полягає в узагальненні вимог директив ЄС з управління відходами та формуванні вимог до запровадження в рамках угоди про асоціацію.

Матеріали і методи

Для досягнення поставленої мети застосовується два методи: порівняльно-правовий та системний [13]. За допомогою порівняльно-правового методу проводили зіставлення норм вітчизняного законодавства та директив ЄС. Зокрема, проводилась оцінка відповідності національного законодавства міжнародним стандартам на основі виділення критеріїв порівняння та безпосереднього зіставлення тверджень для виявлення подібностей і відмінностей та формулювання висновків. За допомогою системного методу проводили встановлення зв’язків між різними вимогами, а також проводили аналіз ієрархії для виявлення функціонального призначення кожного елемента.

Результати дослідження

Аналіз вимог **Рамкової директиви про відходи (2008/98/ЄС)**, яка встановлює загальну філософію поводження з відходами, а також вимог Директиви Ради 1999/31/ЄС про захоронення відходів [14], Директиви 2006/21/ЄС про управління відходами видобувної промисловості [15], Директиви 2012/19/ЄС про відходи електричного та електронного обладнання [16] та Директиви 2006/66/ЄС про батареї та акумулятори наведені в табл. 1. Зазначимо, що політика Європейського Союзу у сфері управління відходами еволюціонувала

від простого регулювання утилізації до центрального елементу амбітних стратегій – Плану дій з циркулярної економіки (CEAP) та Європейського зеленого курсу (European Green Deal). Фундаментальна мета полягає не лише в управлінні відходами, а й у підвищенні ефективності використання ресурсів та відокремленні економічного зростання від їх споживання. Ця трансформація відображає перехід від лінійної моделі економіки «видобути-виробити-викинути» до циркулярної, де відходи розглядаються як цінний ресурс. В основі політики ЄС у сфері відходів є п'ятиступенева ієрархія, яка встановлює пріоритетний порядок дій, який держави-члени повинні застосовувати у своєму законодавстві. Пріоритети розташовані таким чином, щоб забезпечити найкращий екологічний результат:

1. Запобігання (Prevention) – це заходи, які вживаються для зменшення кількості відходів.
2. Підготовка до повторного використання (Preparing for re-use) – це операції з перевірки, очищення або ремонту, після яких продукти або їх компоненти можуть бути використані повторно.
3. Переробка (Recycling) – це будь-яка операція з відновлення, в результаті якої відходи переробляються на продукцію, матеріали або речовини.
4. Інше відновлення (Other recovery) – це енергетичне відновлення, коли відходи використовуються як паливо для виробництва енергії.
5. Видалення (Disposal) – це будь-яка операція, що не є відновленням, наприклад, захоронення на полігоні, яка є найменш бажаним варіантом.

Таблиця 1. Аналіз ключових вимог Директив ЄС та їх відповідність у вимогах національного законодавства

Директива ЄС (Номер та назва)	**Ключові вимоги ЄС (Резюме)**	**Відповідність національному законодавству**
Директива 2008/98/ЄС (Рамкова директива про відходи)	Впровадження 5-ступеневої ієрархії відходів; запровадження РВВ для ключових продуктів; кодифікація принципу "забруднювач платить"; визначення критеріїв "побічного продукту" та "припинення статусу відходів".	У Рамковому Законі України "Про управління відходами" стаття 4 безпосередньо закріплює п'ятиступеневу ієрархію поводження з відходами, повністю відтворюючи пріоритетність, встановлену Директивою, а стаття 10 створює правову основу для розширеної відповідальності виробника (РВВ), визначаючи її сферу застосування (упаковка, відходи електричного та електронного обладнання (ВЕЕО), батареї та акумулятори тощо) та обов'язки виробників щодо організації та фінансування систем збирання та переробки.
Директива 1999/31/ЄС (про захоронення відходів)	Встановлення класів полігонів; вимога щодо попередньої обробки відходів; жорсткі технічні стандарти; фінансові гарантії; цілі зі	В Рамковому Законі України "Про управління відходами" визначена ієрархія поводження з відходами (де захоронення є найменш бажаним варіантом).

	скорочення захоронення біорозкладних відходів.	В Національній стратегії управління відходами та Національному плані управління відходами до 2030 року зазначається необхідність зменшення обсягів захоронення відходів та збільшення їх переробки й створення сучасної інфраструктури.
Директива 2006/21/ЄС (про відходи видобувної промисловості)	Вимога щодо отримання дозволу на основі плану управління відходами; класифікація об'єктів за ризиком (Категорія А); фінансова гарантія на рекультивацію; політика запобігання великим аваріям.	Розроблено законопроєкт "Про управління відходами видобувної промисловості", в якому передбачено запровадження Плану управління відходами як обов'язок для надрокористувачів; дозвільна система; класифікація місць розміщення відходів видобувної промисловості; вимоги до об'єктів їх проєктування, будівництва, управління, закриття та післяексплуатаційного періоду; фінансові гарантії для покриття витрат на ліквідацію наслідків можливих аварій та рекультивацію територій; відповідальність щодо порушення вимог законодавства у сфері управління відходами.
Директива 2012/19/ЄС (про відходи електричного та електронного обладнання – ВЕЕО)	Впровадження РВВ для виробників ВЕЕО; встановлення високих цілей зі збирання та переробки; організація систем роздільного збирання; безкоштовне повернення малих ВЕЕО.	Розроблено проєкт Закону "Про відходи електричного та електронного обладнання", який передбачає деталізацію принципу РВВ; встановлення цілей щодо збору, повторного використання, переробки та відновлення ВЕЕО; систему збору ВЕЕО, включаючи пункти збору від населення, роздрібних продавців тощо; вимоги до обробки, повторного використання та переробки ВЕЕО; реєстр виробників електричного та електронного обладнання та звітність.
Директива 2006/66/ЄС (про батареї та акумулятори)	Обмеження небезпечних речовин (Hg,Cd); впровадження РВВ для виробників батарей; встановлення цілей зі збирання та ефективності переробки.	Законопроєкт "Про відходи електричного та електронного обладнання", який передбачає чіткі обов'язки виробників/імпортерів ВЕЕО та механізми їхньої фінансової відповідальності, а також визначення національних цілей збору та переробки ВЕЕО, систему роздільного збору ВЕЕО (через роздрібні мережі, спеціалізовані пункти збору, муніципальні системи) та вимоги до підприємств, що займаються збиранням, обробкою та переробкою ВЕЕО.

В таблиці 2 наведені дані щодо статусу імплементації директив ЄС в національне законодавство, а також ключові виклики. Проведений порівняльний аналіз між національним законодавством і вимогами Директив ЄС свідчить про значний успіх України в ухваленні фундаментального рамкового законодавства, що є основою для всієї реформи управління відходами, однак залишається суттєва робота щодо ухвалення спеціальних законів (про ВЕЕО, відходи видобувної промисловості) та величезного масиву підзаконних актів, необхідних для повноцінного функціонування системи.

Таблиця 2. Термін й статус імплементації та ключові виклики

Директива ЄС (Номер та назва)	**Термін імплементації (згідно з Додатком XXX)**	**Статус імплементації та ключові виклики**
Директива 2008/98/ЄС (Рамкова директива про відходи)	3 роки з дати набрання чинності Угодою для розробки планів і програм; 5 років для імплементації ключових положень.	Рамковий закон транспоновано. Повна імплементація залежить від ухвалення численних підзаконних актів. Виклики: інституційна спроможність муніципалітетів, створення ринку вторинної сировини.
Директива 1999/31/ЄС (про захоронення відходів)	4 роки для розробки національної стратегії; до 10 років для імплементації технічних вимог та досягнення проміжних цілей.	Основи закладено. Виклик: величезні капітальні інвестиції для модернізації/будівництва полігонів та іншої інфраструктури для досягнення цілі в 10% захоронення.
Директива 2006/21/ЄС (про відходи видобувної промисловості)	2 роки для транспозиції основних положень; 5 років для повної імплементації.	Імплементація відстає. Закон досі на стадії проєкту. Виклики: опір з боку промисловості через значні фінансові зобов'язання (гарантії).
Директива 2012/19/ЄС (про відходи електричного та електронного обладнання – ВЕЕО)	3 роки для транспозиції; подальші терміни для досягнення цілей зі збирання.	Імплементація відстає. Успіх повністю залежить від функціонування загальної системи РВВ. Виклики: створення логістики збирання та переробки по всій країні.
Директива 2006/66/ЄС (про батареї та акумулятори)	2 роки для транспозиції; подальші терміни для досягнення цілей зі збирання.	Імплементація відстає. Виклики: створення ефективної системи збирання портативних батарей від населення; законодавство ЄС вже оновилося до значно суворішого Регламенту.

У таблиці 3 наведені результати аналізу щодо відповідності Рамкового Закону України "Про управління відходами" вимогам **Директиви 2008/98/ЄС**. Загалом за ключовими поняттями зазначені нормативні документи являються тотожними. Разом з тим, в Рамковому Законі України "Про управління відходами" не згадується про необхідність прийняття рішень на основі керування ризиками, що не відповідає логіці **Директиви 2008/98/ЄС**, яка націлена на превентивне управління та мінімізацію ризиків, що за своєю суттю

є впровадженням ключових елементів процесу керування ризиками. Зокрема, Стаття 13 **Директиви 2008/98/ЄС** прямо вимагає, щоб поводження з відходами не створювало ризику для води, повітря, ґрунту, рослинного та тваринного світу, не створювало шуму чи запаху та не чинило негативного впливу на ландшафт. В Законі України «Про управління відходами" вказується, що саме управління здійснюється на основі комбінації правових, організаційних, економічних та інформаційних механізмів, які зазначені в табл. 3. Однак, при цьому, в Законі не передбачається управління на основі керування ризиками. Більше того, саме слово ризик згадується один раз в статті 24 щодо повноважень центрального органу виконавчої влади у сфері управління відходами, де зазначена необхідність затвердження методичних настанов щодо аналізу ризиків для здоров'я людини відходів та об'єктів оброблення відходів.

Виникає логічне запитання, яким чином Закон передбачає прийняття управлінських рішень щодо поводження з відходами як суб'єктів господарювання, так і державних органів. Відповідь на поставлене питання відсутня і потребує внесення відповідних правок. Також роз'яснення на зазначене питання відсутнє і в Порядку розроблення планів управління відходами підприємств, установ та організацій, який затверджено Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 09 серпня 2024 року № 1003.

Таблиця 3. Результати аналізу щодо відповідності Рамкового Закону України "Про управління відходами" вимогам **Директиви 2008/98/ЄС**

№ п.п	**Основні вимоги Директиви 2008/98/ЄС**	**Основні вимоги Рамкового Закону України "Про управління відходами"**
1	Ієрархія пріоритетів поводження з відходами. Запобігання утворенню відходів. Підготовка до повторного використання. Переробка (рециклінг). Інші види утилізації (відновлення). Видалення (ліквідація).	Ієрархія пріоритетів поводження з відходами. Запобігання утворенню відходів. Підготовка до повторного використання. Переробка (рециклінг). Інші види утилізації (відновлення). Видалення (ліквідація).
2	Держави-члени зобов'язані розробляти та впроваджувати національні та/або регіональні, та/або місцеві плани управління відходами, що охоплюють усю територію країни.	Закон передбачає розробку та затвердження Національного плану управління відходами.
3	Цей принцип передбачає, що виробники несуть відповідальність за життєвий цикл своєї продукції, включно з її утилізацією після закінчення терміну служби.	Закон передбачає розширену відповідальність виробника для окремих категорій продукції (наприклад, упаковка, електроніка, батарейки).
4	Директива встановлює систему класифікації відходів, включаючи визначення "небезпечних відходів" та їх властивостей, які роблять їх небезпечними (наприклад, вибуховість, окисність тощо).	Запроваджується нова система класифікації відходів згідно з європейським каталогом (EWC – European Waste Catalogue).

5	Підприємства, що здійснюють операції з оброблення відходів, повинні отримати дозвіл від компетентного органу.	Встановлюються нові вимоги до отримання дозволів на здійснення операцій з управління відходами.
6	Роздільне збирання відходів.	Закон зобов'язує місцеві органи влади організувати роздільне збирання побутових відходів, принаймні для таких категорій, як скло, папір, пластик, метал.
7	Цілі щодо переробки.	Встановлення цілей щодо переробки.
8	Посилені вимоги до поводження з небезпечними відходами, включаючи їх облік, збір, транспортування та обробку.	Закон встановлює, що операції з небезпечними відходами (збирання, перевезення, оброблення, відновлення, видалення) підлягають ліцензуванню.
9	-	Запроваджується ведення реєстрів у сфері управління відходами в електронному вигляді.

В результаті проведеного аналізу можна узагальнити наскрізні виклики імплементації національного законодавства в сфері управління відходами з вимогами Директив ЄС, що полягають у необхідності: зміцнення органів державної влади як на національному (Міністерство захисту довкілля), так і на місцевому рівнях для управління новими, складними системами; знаходження фінансових механізмів, з огляду на значні фінансові витрати, пов’язані з побудовою нової інфраструктури (заводів з переробки тощо), та виклик створення самоокупних фінансових моделей для РВВ; ухвалення законів та забезпечення їх виконання, що вимагає ефективних систем моніторингу, інспектування та накладення санкцій; мотивації участі громадськості до управління відходами для успішного функціонування нових систем, таких як роздільне збирання відходів.

Обговорення результатів дослідження

Директива 2008/98/ЄС встановлює чіткі юридичні критерії для розрізнення "відходів" та "побічних продуктів" – речовин, що виникають у процесі виробництва, не є його основною метою, але можуть бути використані безпосередньо без подальшої обробки. Також вона вводить поняття статусу "припинення відходів" (*end-of-waste*), згідно з яким певні перероблені відходи перестають вважатися відходами після того, як вони відповідають встановленим критеріям якості, що дозволяє поводитися з ними як з продукцією [4, 17]. Ці концепції є критично важливими для розвитку повноцінної циркулярної економіки та ринку вторинної сировини. Крім Рамкового Закону України "Про управління відходами", також ухвалено декілька підзаконних актів, таких як Постанови Кабінету Міністрів України "Деякі питання декларування припинення статусу відходів" (№ 827) та "Деякі питання класифікації речовин або предметів як побічного продукту" (№ 1214), що є свідченням конкретних кроків з імплементації цих складних концепцій [9, 11, 18].

Директива про захоронення відходів є найбільшим довгостроковим фінансовим та інфраструктурним викликом. Вона вимагає повної перебудови національної інфраструктури: будівництва сортувальних та переробних заводів, сміттєспалювальних установок тощо [6, 19]. Розрив між поточною реальністю в Україні та цільовим показником ЄС є величезним і не може бути подоланий лише ухваленням законодавства. Досягнення відповідності цій Директиві буде найбільш капіталомісткою частиною всієї реформи, що вимагатиме десятиліть стійких інвестицій, ймовірно, зі значною залежністю від міжнародної фінансової підтримки.

Імплементація директив щодо ВЕЕО та батарей не є автономним процесом. Їхній успіх причинно-наслідково пов'язаний із успішною реалізацією загальної рамкової системи РВВ, передбаченої Законом «Про управління відходами», і залежить від неї. Без діючої національної системи РВВ спеціальні закони щодо ВЕЕО та батарей будуть неможливими для виконання. Затримка з ухваленням спеціальних законів може бути частково пов'язана з необхідністю спочатку створити та ввести в дію загальний механізм РВВ. Неможливо побудувати специфічну систему відповідальності виробників батарей, якщо загальний правовий та інституційний механізм для таких систем ще не існує та не функціонує на практиці.

Правова система ЄС є динамічною. Європейський зелений курс значно прискорив розвиток екологічного законодавства [20]. Додаток, що базується на *acquis* більш ніж десятирічної давнини, потребуватиме оновлення, щоб відобразити нові реалії, такі як Регламент про батареї та посилений акцент на принципах циркулярної економіки. Це є ключовою сферою для майбутнього діалогу між Україною та ЄС, особливо в контексті статусу України як країни-кандидата на вступ до ЄС.

Поки Україна працює над імплементацією Директиви про батареї 2006 року, ЄС вже ухвалив значно суворіший **Регламент про батареї (ЄС) 2023/1542**. Цей новий Регламент вводить вимоги щодо вуглецевого сліду, вмісту перероблених матеріалів та цифрового "паспорта батареї", що виходять далеко за межі Директиви 2006 року. Це означає, що до моменту, коли Україна досягне повної відповідності своїм формальним зобов'язанням, її законодавство вже буде застарілим порівняно з поточними стандартами ЄС. Для українських виробників, які бажають експортувати свою продукцію до ЄС, простого дотримання транспонованого українського законодавства буде недостатньо. Їм доведеться відповідати вимогам нового Регламенту ЄС для доступу на ринок. Це створює подвійний виклик відповідності та сильний стимул для України здійснити "стрибок" безпосередньо до стандартів нового Регламенту, навіть якщо це формально не вимагається поточним текстом Угоди про асоціацію. Це є критично важливим стратегічним міркуванням для майбутніх оновлень Додатка XXX.

Висновки

В основі Законодавства Європейського Союзу у сфері управління відходами лежить Рамкова директива про відходи, яка встановлює фундаментальні принципи, такі як п'ятиступенева ієрархія, розширена відповідальність виробника та критерії припинення статусу відходів.

Рамкова директива про відходи доповнюється низкою спеціалізованих директив та регламентів, що встановлюють амбітні, юридично обов'язкові цілі для конкретних відходів, зокрема для упаковки, ВЕЕО, батарей та захоронення.

Ключовими викликами для імплементації національного законодавства до вимог директив ЄС залишаються залучення інвестицій в інфраструктуру (особливо для виконання вимог Директиви про захоронення), практичне впровадження систем РВВ та необхідність постійно наздоганяти законодавство ЄС, що швидко розвивається. Це потребує від промисловості та бізнесу переходу від ментальності простого дотримання вимог до проактивних дій, тобто розробки стратегії для РВВ, інвестування в чистіші технології виробництва та передбачення майбутніх вимог ЄС (як-от Регламент про батареї), щоб зберегти доступ до ринку та конкурентоспроможність.

Законодавство Європейського Союзу у сфері управління відходами підкріплено економічними стимулами та інституційною підтримкою, є рушійною силою трансформації промисловості і виробничих практик у напрямку сталого розвитку та ефективного використання ресурсів у межах Європейського Союзу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Харитонов, Р. Ф., & Дімова, К. О. (2022). Загальна характеристика Угоди про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським Співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони, від 27 червня 2014 року. *Європейський вибір України, розвиток науки та національна безпека в реаліях масштабної військової агресії та глобальних викликів XXI століття: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (Т. 1, с. 423–425). Одеса: Видавничий дім «Гельветика». https://dspace.onua.edu.ua/items/b05b1f60-3cf4-4a99-928c-e862a84a27c4

2. Шмиголь, Н. М., Кайнара, Д. О., & Антонюк, А. А. (2013). Вплив Угоди про асоціацію між Україною та ЄС на економічне становище. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємство*, (6), 27–30. http://nbuv.gov.ua/UJRN/drep_2013_6_7

3. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони від 27 червня 2014 року. http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/984_011

4. Савченко, В. Ф. (2021). Угода про асоціацію України з ЄС – шляхи реалізації переваг. *Проблеми і перспективи економіки та управління*, 2(6), 24–34. http://ppeu.stu.cn.ua/article/view/95747

5. Войціховська, А., Кравченко, О., Мелень-Забрамна, О., та ін. (2019). *Кращі європейські практики управління відходами*. Львів: Видавництво «Компанія «Манускрипт». https://epl.org.ua/human-posts/krashhi-yevropejski-praktyky-upravlinnya-vidhodamy-posibnyk/

6. Омельяненко, Т. Л. (2013). Особливості імплементації директиви 2006/21/ЄС про управління відходами видобувної промисловості в Україні. *Ефективна економіка*, (11). http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2013_11_64

7. Повякель, Л. І., Сноз, С. В., Смердова, Л. М., & Кривенчук, В. Є. (2016). Нові підходи у сфері поводження з відходами в Україні в зв'язку з імплементацією природоохоронних директив Європейського Союзу до вітчизняного законодавства. *Сучасні проблеми токсикології, харчової та хімічної безпеки*, 1(73), 5–12. http://protox.medved.kiev.ua/index.php/ua/issues/2016/1/item/475

8. Синчанський, С. О. (2024). Приведення законодавства України щодо управління небезпечними відходами у відповідність з вимогами права Європейського Союзу. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право*, 3(86), 180–189. https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.27
9. Орєхов, С. (2019). Адаптація права України до права ЄС у сфері охорони довкілля в рамках Угоди про асоціацію. *Екологічне право*, (2), 80–83. http://pgp-journal.kiev.ua/archive/2019/2/16.pdf
10. Брусенцева, Т. В., Корольова, Н. С., Німець, Н. М., & Цапко, Н. С. (2023). Основні аспекти імплементації Закону про управління відходами до європейського законодавства. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах*, (2), 3–10. https://doi.org/10.20998/2220-4784.2023.02.01
11. Волкова, Ю. (2023). Перспективи розвитку законодавства України щодо поводження з відходами в процесі адаптації до вимог Європейського Союзу. *Law. State. Technology*, 1, 27–34. https://doi.org/10.32782/LST/2023-1-4
12. Зуєв, В. А. (2014). Організаційно-правові проблеми забезпечення реалізації громадської та виробничої екологічної політики у сфері поводження з відходами. *Проблеми законності*, (125), 138–144. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pz_2014_125_19
13. Назаренко, А. М. (2014). Порівняльно-правовий аналіз законодавчого закріплення кваліфікуючої ознаки крадіжки «з проникненням у житло, інше приміщення чи сховище». *Вісник Маріупольського державного університету. Серія: Право*, (7), 261–267. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vmdu_pr_2014_7_33
14. Костенко, С., Маяк, О., & Федак, Н. (2023). Системний аналіз як інструмент сучасного інжинірингу. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету*, 12(1), 1–9. https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v12i1.300
15. European Parliament & Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:en:PDF
16. European Parliament & Council of the European Union. (2006). *Directive 2006/12/EC on waste*. *Official Journal of the European Union*, L 114, 9–21. https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0009:0021
17. European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/851 of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*. https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0109.01.ENG
18. Балануца, О. О. (2024). Адаптація законодавства України до права ЄС як складова сучасного правотворення в Україні: сучасний стан та виклики. *Юридичний науковий електронний журнал*, (12), 656–659. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-12/153
19. Прокопенко, Л., & Тішкова, Н. (2019). Процес імплементації європейського законодавства у сфері охорони навколишнього середовища України. *Аспекти публічного управління*, 7(4), 35–43. https://doi.org/10.15421/151921
20. Орловська, Ю. В. (Ред.). (2023). *Політика ЄС щодо зеленої економіки та інновацій*. Дніпро: ПДАБА. https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2023/02/Pidruchnyk-Polityka-YES.pdf

Стаття надійшла до редакції 11.07.2025 і прийнята до друку після рецензування 14.10.2025

REFERENCES

1. Kharytonov, R. F., & Dimova, K. O. (2022). Zahalna kharakterystyka Uhody pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu, z odniiei storony, ta Yevropeiskym Soiuzom, Yevropeiskym Spivtovarystvom z atomnoi enerhii i yikhnimy derzhavamy-chlenamy, z inshoi storony, vid 27 chervnia 2014 roku. *The European choice of Ukraine, the development of science and*

national security in the realities of large-scale military aggression and global challenges of the 21st century: Materials of the International Scientific and Practical Conference (Vol. 1, pp. 423–425). Odesa: Helvetica Publishing House. https://dspace.onua.edu.ua/items/b05b1f60-3cf4-4a99-928c-e862a84a27c4 [in Ukrainian].
2. Shmyhol, N. M., Kainara, D. O., & Antoniuk, A. A. (2013). Vplyv Uhody pro asotsiatsiiu mizh Ukrainoiu ta YeS na ekonomichne stanovyshche. *State and Regions. Economy and Enterprise Series*, (6), 27–30. http://nbuv.gov.ua/UJRN/drep_2013_6_7 [in Ukrainian].
3. Association Agreement between Ukraine, of the one part, and the European Union, the European Atomic Energy Community and their Member States, of the other part (2014, June 27). http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/984_011 [in Ukrainian].
4. Savchenko, V. (2021). Ukraine Association Agreement with the EU – ways of benefits. *Problems and Prospects of Economics and Management*, 2(6), 24–34. http://ppeu.stu.cn.ua/article/view/95747
5. Voitsikhovska, A., Kravchenko, O., Melen-Zabramna, O., et al. (2019). *Krashchi yevropeiski praktyky upravlinnia vidkhodamy*. Lviv: Publishing House "Manuscript Company". https://epl.org.ua/human-posts/krashhi-yevropejski-praktyky-upravlinnya-vidhodamy-posibnyk/ [in Ukrainian].
6. Omelianenko, T. L. (2013). Osoblyvosti implementatsii dyrektyvy 2006/21/YeS pro upravlinnia vidkhodamy vydobuvnoi promyslovosti v Ukraini. *Efficient Economy*, (11). http://nbuv.gov.ua/UJRN/efek_2013_11_64 [in Ukrainian].
7. Povyakel, L., Snoz, S., Smerdova, L., & Krivenchuk, V. (2016). New approaches in the field of waste management in Ukraine in connection with the implementation of European Union environmental directives into national legislation. *Current Problems of Toxicology, Food and Chemical Safety*, 1(73), 5–12. http://protox.medved.kiev.ua/index.php/ua/issues/2016/1/item/475 [in Ukrainian].
8. Synchanskyy, S. O. (2024). Bringing the legislation of Ukraine on hazardous waste management in line with the requirements of the European Union law. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: Law*, 3(86), 180–189. https://doi.org/10.24144/2307-3322.2024.86.3.27 [in Ukrainian].
9. Oriekhov, S. (2019). Adaptatsiia prava Ukrainy do prava EU u sferi okhorony dovkillia v ramkakh uhody pro asotsiatsiiu. *Environmental Law*, (2), 80–83. http://pgp-journal.kiev.ua/archive/2019/2/16.pdf [in Ukrainian].
10. Brusentseva, T., Koroleva, N., Nimets, N., & Tsapko, N. (2023). Main aspects of the implementation of the law on waste management in European legislation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Innovation Researches in Scientific Works*, (2), 3–10. https://doi.org/10.20998/2220-4784.2023.02.01 [in Ukrainian].
11. Volkova, Y. (2023). Prospects for the development of Ukrainian legislation on waste management in the process of adaptation to the requirements of the European Union. *Law. State. Technology*, 1, 27–34. https://doi.org/10.32782/LST/2023-1-4 [in Ukrainian].
12. Zuiev, V. A. (2014). Orhanizatsiino-pravovi problemy zabezpechennia realizatsii hromadskoi ta vyrobnychoi ekolohichnoi polityky u sferi povodzhennia z vidkhodamy. *Legality Issues*, (125), 138–144. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pz_2014_125_19 [in Ukrainian].
13. Nazarenko, A. M. (2014). Porivnialno-pravovyi analiz zakonodavchoho zakriplennia kvalifikuiuchoi oznaky kradizhky "z pronyknenniam u zhytlo, inshe prymishchennia chy skhovyshche". *Visnyk of Mariupol State University. Series: Law*, (7), 261–267. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vmdu_pr_2014_7_33 [in Ukrainian].
14. Kostenko, S., Mayak, O., & Fedak, N. (2023). System analysis as a modern engineering tool. *Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University*, 12(1), Article 300. https://doi.org/10.31388/sbtsatu.v12i1.300 [in Ukrainian].
15. European Parliament & Council of the European Union. (2008). *Directive 2008/98/EC of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives*. https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:en:PDF

16. European Parliament & Council of the European Union. (2006). *Directive 2006/12/EC on waste. Official Journal of the European Union*, L 114, 9–21. https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:114:0009:0021
17. European Parliament & Council of the European Union. (2018). *Directive (EU) 2018/851 of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*. https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.150.01.0109.01.ENG
18. Balanutsa, O. (2024). Adaptation of Ukrainian legislation to EU law as a component of modern legislation in Ukraine: Current status and challenges. *Legal Scientific Electronic Journal*, (12), 656–659. https://doi.org/10.32782/2524-0374/2024-12/153 [in Ukrainian].
19. Prokopenko, L., & Tishkova, N. (2019). The process of implementation of European legislation in the sphere of environmental protection of Ukraine. *Public Administration Aspects*, 7(4), 35–43. https://doi.org/10.15421/151921 [in Ukrainian].
20. Orlovska, Yu. V. (Ed.). (2023). *Polityka EU shchodo zelenoi ekonomiky ta innovatsii*. Dnipro: PDABA. https://pgasa.dp.ua/wp-content/uploads/2023/02/Pidruchnyk-Polityka-YES.pdf [in Ukrainian].

The article was received 11.07.2025 and was accepted after revision 14.10.2025

Цопа Віталій Андрійович
доктор технічних наук, професор кафедри менеджменту, Міжнародний інститут менеджменту
Адреса робоча: Вул. Шулявська, 10/12, м. Київ, Україна, 04116
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4811-3712 ***e-mail***: dr.tsopav@gmail.com

Негрій Тетяна Олександрівна
кандидатка технічних наук, доцентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва і архітектури
Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4239-3178 ***e-mail:*** tetiana.nehrii@gmail.com

Дерюгін Олег Валентинович
кандидат технічних наук, доцент кафедри управління на транспорті, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2456-7664 ***e-mail***: deryugin_o@ukr.net

Чеберячко Лідія Миколаївна
аспірантка кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища, Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"
Адреса робоча: пр. Яворницького, 19, м. Дніпро, Україна, 49005
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-2685-7809 ***e-mail:***cheberiachko.lm@nmu.one

UDK 628.3:712.3

Kostiantyn Shumbar, postgraduate student
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-0201-2142 ***e-mail:*** k.w.shumbar@gmail.com

Maryna Kravchenko, Dr. Sc. (Tech.), Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0428-6440 ***e-mail:*** marina-diek@ukr.net

Lesya Vasylenko, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0428-6440 ***e-mail:*** vasylenko.lo@knuba.edu.ua

Tetiana Tkachenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2105-5951 ***e-mail***: tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Olena Voloshkina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3671-4449 ***e-mail:*** voloshkina.os@knuba.edu.ua

Andrii Shcherbak, postgraduate student
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-4594-6412 ***e-mail:*** andron.vr@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

COMPREHENSIVE EMERGENT ASSESSMENT OF ECOSYSTEM SERVICES AND ECONOMIC EFFICIENCY OF URBAN GREEN STRUCTURES

Abstract. *Rapid urbanisation in recent years has led to the deterioration of urban ecosystems and the emergence of numerous environmental and socio-economic problems. In response to these challenges, the implementation of green structures has gained considerable popularity as a sustainable approach to urban planning. This paper presents a comprehensive assessment of the costs, benefits (ecosystem services) and impacts (ecosystem disservices) associated with the use of green structures in the urban environment, using the emergy accounting approach, which allows for the quantitative assessment of resource costs in biophysical units through the prism of energy transformations. To achieve this goal, a new integrated assessment system is proposed, covering key components: assessment of the costs of implementing and operating green structures, assessment of ecosystem services, determination of environmental costs to compensate for damage to public health and biodiversity, and identification of ecosystem disservices. In particular, the economic efficiency of green walls in reducing noise pollution is investigated using the example of typical urban configurations of apartment buildings. The results show that green roofs provide greater benefits to the ecosystem compared to other types of green structures, but they are accompanied by high initial construction costs and require more intensive maintenance. Green walls demonstrated the highest emergent costs for noise pollution reduction (5.77×10^{12} sej/m²·year), indicating their potential effectiveness in improving the city's acoustic environment.*

© К.В. Шумбар, М.В. Кравченко, Л.О. Василенко, Т.М. Ткаченко, О.С. Волошкіна, А.І. Щербак, 2025

Cost-benefit calculations are presented for two simulated architectural configurations, reflecting the impact of green walls on noise reduction and aesthetic benefits for residents; the results show that in both cases the benefits significantly outweigh the costs. The data obtained provides valuable information for urban planners, policymakers and other stakeholders, facilitating informed decisions on the development of sustainable cities to ensure the well-being of current and future generations.
Keywords: *urban green infrastructure, green structures, ecosystem services, emergy accounting, cost-effectiveness, noise protection function.*

К.В. Шумбар, М.В. Кравченко, Л.О. Василенко, Т.М. Ткаченко, О.С. Волошкіна, А.І. Щербак

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

КОМПЛЕКСНА ЕМЕРГІЙНА ОЦІНКА ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ І ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МІСЬКИХ ЗЕЛЕНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Анотація. *Стрімка урбанізація останніх років призвела до погіршення стану міських екосистем та виникнення численних екологічних і соціально-економічних проблем. Як відповідь на ці виклики, впровадження зелених конструкцій набуло значної популярності як сталий підхід до міського планування. У цій роботі представлено комплексну оцінку витрат, вигод (екосистемних послуг) та впливів (екосистемних диспослуг), пов'язаних із застосуванням зелених конструкцій у міському середовищі, з використанням підходу емергійного обліку (emergy accounting), який дозволяє кількісно оцінювати ресурсні витрати у біофізичних одиницях через призму енергетичних трансформацій. Для досягнення цієї мети запропоновано нову інтегровану систему оцінки, яка охоплює ключові компоненти: оцінку витрат на впровадження та експлуатацію зелених конструкцій, оцінку екосистемних послуг, визначення екологічних витрат на компенсацію шкоди для здоров'я населення та біорізноманіття, а також ідентифікацію екосистемних диспослуг. Зокрема, досліджено економічну ефективність зелених стін у зниженні шумового навантаження на прикладі типових міських конфігурацій багатоквартирних будинків. Результати показують, що зелені дахи забезпечують більші переваги для екосистеми порівняно з іншими типами зелених конструкцій, однак вони супроводжуються високими початковими витратами на будівництво та потребують більш інтенсивного обслуговування. Зелені стіни продемонстрували найвищі емергійні витрати на зниження шумового забруднення ($5{,}77\times10^{12}$ sej/м²·рік), що вказує на їхню потенційну ефективність у покращенні акустичного середовища міста. Наведено розрахунки співвідношення вигод і витрат для двох імітованих архітектурних конфігурацій, що відображають вплив зелених стін на зниження шумового навантаження та естетичні переваги для мешканців; результати свідчать, що в обох випадках вигоди суттєво перевищують витрати. Отримані дані надають цінну інформацію для міських планувальників, політиків та інших зацікавлених сторін, сприяючи прийняттю обґрунтованих рішень щодо розвитку сталих міст для забезпечення добробуту нинішніх і майбутніх поколінь.*
Ключові слова: *міська зелена інфраструктура, зелені конструкції, екосистемні послуги, емергійний облік, економічна ефективність, шумозахисна функція.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.20-34

Вступ

Міські території стикаються зі зростаючими екологічними та соціальними проблемами, такими як підвищення температури, погіршення якості повітря, обмеженість зелених насаджень та шумове забруднення [1]. Основними факторами цих проблем є поширення твердих поверхонь [2], швидка урбанізація [3] та технологічний розвиток, що сприяє надмірному накопиченню тепла [4], погіршенню циркуляції повітря та підвищенню залежності від енергоємних систем охолодження. Наслідком цього є не лише зниження комфорту проживання та якості повітря, а й посилення ефекту міських теплових островів та збільшення енергоспоживання для охолодження [5].

Одним із перспективних напрямів екологічної трансформації міського простору є впровадження елементів зеленої інфраструктури, зокрема зелених конструкцій – дахів, стін, фасадів і дощових садів, які поєднують екологічні, соціальні та естетичні функції в умовах щільної урбанізації. Стратегічні документи, зокрема Порядок денний ООН у сфері сталого розвитку міст, акцентують на необхідності збільшення площі зелених елементів у містах. Європейська політика у сфері інновацій підтримує інтеграцію природоорієнтованих рішень, зокрема вертикального та покрівельного озеленення, у просторове планування як ефективну відповідь на соціально-екологічні виклики [6]. У межах сучасної концепції зелена інфраструктура розглядається як система природних і техногенно адаптованих компонентів, що забезпечують ключові екосистемні послуги – зниження забруднення повітря і температури, акумуляцію дощової води, поглинання CO_2, підвищення біорізноманіття та зменшення шуму в міських умовах [7].

Конкретні типи зелених конструкцій мають спеціалізовані функціональні переваги, які дозволяють адаптувати їх до просторових і кліматичних особливостей міських територій [8]. На відміну від традиційних зелених насаджень, які потребують значних площ, ці системи дозволяють максимально ефективно використовувати покрівельні та вертикальні поверхні, зберігаючи щільність міської забудови та водночас забезпечуючи екологічну ефективність [9].

Недостатньо обґрунтоване впровадження або неналежна експлуатація зелених конструкцій у міському середовищі може призводити до порушення надання екосистемних послуг і виникнення так званих екосистемних диспослуг – негативних екологічних або соціальних наслідків [10]. Важливо визначити межу, за якої зелена конструкція перестає бути корисною та починає створювати ризики для добробуту населення. Наприклад, надмірне пилкування рослин може провокувати алергічні реакції, а незбалансоване озеленення вертикальних або дахових поверхонь – сприяти накопиченню шкідників або поширенню небажаних видів [11].

Зелені конструкції, що потребують регулярного технічного обслуговування, можуть створювати додаткові навантаження. Зокрема, використання важкої техніки для догляду за інтенсивними зеленими дахами спричиняє ущільнення субстрату, зниження його водоутримуючої здатності та деградацію ґрунтових функцій [12]. За відсутності ефективного дренажу у дощовий період можливе накопичення вологи, що ускладнює експлуатацію конструкцій. Також рослинне опадання з фасадів і дахів може потрапляти у вентиляційні системи або створювати дискомфорт для мешканців.

Попри потенційні ризики, зелені конструкції залишаються важливою складовою сталого міського розвитку. Їх інтеграція має базуватися на урахуванні можливих диспослуг і заходах щодо їх мінімізації. Оцінка еколого-економічної цінності таких конструкцій є міждисциплінарним завданням, яке досі не охоплює повною мірою кількісне визначення як вигод, так і ризиків, пов'язаних з їх функціонуванням у міському середовищі [13].

Альтернативою до економікоцентричних методів є підхід emergy accounting, що дозволяє кількісно оцінювати ресурсні витрати в біофізичних одиницях через енергетичні трансформації. Згідно з концепцією Г.Т. Одума [14], емергія – це сукупна (пряма і непряма) енергія, необхідна для створення продукту чи послуги, виражена у сонячних джоулях. Метод передбачає облік усіх потоків ресурсів (енергії, матеріалів, праці, інформації) в єдиній уніфікованій одиниці виміру. Це дає змогу розглядати зелені конструкції не лише як архітектурні елементи, а як частину енергетично відкритих екосистем, що взаємодіють із локальними та глобальними біофізичними процесами.

Попри успішне застосування підходу emergy для оцінки екосистемних послуг у зелених зонах, досі відсутня уніфікована система для масштабного аналізу вигод і ризиків різних типів зелених конструкцій. Хоча низка досліджень [15] підтверджує ефективність методу у виявленні екологічних переваг, нерідко поза увагою залишаються потенційні негативні наслідки – пошкодження інфраструктури, ризики біологічної активності або недооцінка гідрологічної ефективності в дощовий період.

Метою дослідження є розробка методики оцінки екосистемних функцій та супутніх впливів зелених конструкцій за емергетичним підходом, а також аналіз переваг і диспослуг найпоширеніших типів зелених рішень у міському середовищі.

Практична цінність методології полягає в її використанні як інструменту екологічного планування, що поєднує емергетичний та екосистемний підходи, дозволяючи кількісно оцінювати ефективність зелених конструкцій для забезпечення довгострокової екологічної стійкості. Результати можуть слугувати для оптимізації проєктів, обґрунтування інвестицій у зелену інфраструктуру та розробки муніципальних політик екологічної трансформації міського середовища.

Матеріали та методи

Для комплексного аналізу функціонування міських зелених конструкцій було застосовано метод емергійного аналізу, який охоплює чотири взаємопов'язані напрями оцінки:

1) *Оцінка витрат на впровадження та експлуатацію*. Цей аспект відображає ресурси, необхідні для проєктування, будівництва та обслуговування зелених конструкцій. Розрахунок проводиться шляхом множення витратних потоків (матеріальних, енергетичних, трудових, інформаційних) на одиничні емергетичні значення (*UEV* – Unit Emergy Value). Сумарна енергія дозволяє кількісно визначити енергоємність конструкції та обсяг вкладеного природного капіталу.

2) *Оцінка екосистемних послуг*. Зелені конструкції виконують низку корисних функцій, які класифікуються як проміжні послуги (наприклад, чиста первинна продуктивність – Net Primary Production, *NPP*) та кінцеві послуги

(зокрема, регулювання мікроклімату, шумопоглинання, секвестрація вуглецю, акумуляція дощової води тощо). Для кожної з послуг визначається її кількісний показник $S(P_i)$, після чого застосовується відповідне значення UEV з метою розрахунку емергії, необхідної для забезпечення відповідної екосистемної функції:

$$E_m = S(P_i) \times UEV_i, \quad (1)$$

де $S(P_i)$ – кількість i-ї послуги (наприклад, секвестрації CO_2), а UEV_i – одиничне значення емергії на одиницю цієї послуги або процесу (наприклад, секвестрація 1 г CO_2). Значення $S(P_i)$ для конкретної зеленої конструкції та відповідне UEV для розглянутого процесу визначаються на основі наявних даних у спеціалізованій літературі та дослідженнях у сфері міських зелених інфраструктур.

3) *Оцінка екологічних витрат на компенсацію шкоди для здоров'я населення та біорізноманіття*. Зелені конструкції здатні виконувати компенсаторну функцію, знижуючи ризики та негативні наслідки для довкілля і здоров'я населення, які виникають під впливом соціально-економічних чинників. Їх наявність дозволяє зменшити потребу в енергоємних технологічних заходах, спрямованих на ліквідацію екологічної шкоди. Для кількісної оцінки таких ефектів використовується підхід життєвого циклу – ReCiPe Endpoint 2016 (*LCA*), реалізований із застосуванням бази даних Ecoinvent 3.5 [16].

Зазначена методика дозволяє оцінити два ключові індикатори: шкоду для здоров'я населення, виражену в роках життя з поправкою на інвалідність (*DALY* – Disability-Adjusted Life Years); шкоду для біорізноманіття, що розраховується як зникла частка видів на одиницю площі за певний проміжок часу (PDF × м² × рік, де PDF – Potentially Disappeared Fraction of species).

Обидва показники перетворюються в емергійні одиниці через множення на відповідні UEV, що дозволяє оцінювати втрати як екологічну вартість у термінах енергії для запобігання або компенсації шкоди. За відсутності зелених конструкцій оцінюють альтернативні витрати на інженерні чи технологічні рішення, наприклад, штучну секвестрацію вуглецю або медичні та екосистемні заходи для зменшення впливу глобального потепління. Загальні емергійні витрати (Em_p) у цьому випадку визначаються за формулою:

$$Em_{health} = P \times DALY \times UEV_{DALY}, \quad (2)$$

де P – інтенсивність впливу (наприклад, концентрація CO_2), а UEV – одинична емергійна вартість для відповідного типу шкоди. Отже, порівняння між емергійними витратами на профілактику шкоди за рахунок зелених конструкцій і витратами на технологічну компенсацію дозволяє оцінити екологічну ефективність таких природоорієнтованих рішень у міському середовищі.

4) *Визначення екосистемних диспослуг*. Зелені конструкції, попри численні переваги, можуть спричиняти негативні ефекти: підвищення алергенності повітря, пошкодження інфраструктури кореневими системами, накопичення сміття або ризики, пов'язані з діяльністю тварин. Для кількісної оцінки цих впливів застосовують емергетичний облік, що визначає енергію та ресурси, необхідні для їх усунення або пом'якшення, забезпечуючи комплексну оцінку як вигод, так і потенційних ризиків зелених конструкцій.

1.1. Екосистемні послуги

Генерація чистої первинної продуктивності. NPP відображає обсяг вуглецю, акумульованого рослинністю через фотосинтез з урахуванням дихання, і є ключовим показником біологічної продуктивності зелених конструкцій [17]. В емергетичному аналізі його збільшення свідчить про синергію природних енергетичних потоків та залучених антропогенних ресурсів, що забезпечують сталу роботу конструкції. Емергійна оцінка *NPP* проводиться за формулою:

$$Em_{NPP} = \sum R_{(i)} + \sum P_{(i)}, \quad (3)$$

де Em_{NPP} – загальна емергія (sej/м²/рік), асоційована з формуванням чистої первинної продуктивності; $\sum R_{(i)}$ – сукупна емергія (від i = a до e), що надходить до системи з відновлюваних джерел, які забезпечують підтримку фотосинтетичних процесів: (a) сонячна енергія (Em_{solar}), (b) геотермальні потоки (Em_{geoth}), (c) енергія вітру (Em_{wind}), (d) енергетичний потенціал опадів, включаючи енергію випаровування (Em_{rain}), (e) геопотенціальна та хімічна енергія поверхневого стоку (Em_{runoff}); $\sum P_{(i)}$ – сумарна емергія (від i = 1 до n), пов'язана з антропогенними ресурсами, що застосовуються для експлуатації зелених конструкцій: матеріали, зрошення, добрива, пестициди тощо (у розрахунку на одиницю площі).

Поглинання вуглецю. У системах зелених конструкцій атмосферний CO_2 фіксується фотосинтезом і накопичується у фітомасі та ґрунті у вигляді органічних сполук. Частина вуглецю надходить у ґрунт через опадання листя, кореневу ексудацію та мінералізацію органіки. Сумарне поглинання вуглецю визначається як сума фіксації у вегетативній масі та стабільного збереження у ґрунті. Емергійна оцінка цього процесу для зелених конструкцій проводиться за формулою:

$$Em_{CS} = \sum_i (C_{FRi} \times UEV_{CSi}), \quad (4)$$

де: Em_{CS} – емергія, що підтримує механізм поглинання вуглецю (sej/м²/рік); C_{FRi} – щорічна швидкість фіксації вуглецю компонентом і (г/м²/рік); UEV_{CSi} – одиничне емергійне значення секвестрації вуглецю для відповідної зеленої конструкції (sej/гС).

Акумуляція води в ґрунті. Зелені дахи, конструкції дощових садів та інші зелені конструкції здатні затримувати дощову воду завдяки високій водоутримувальній здатності ґрунтово-рослинного шару. Це сприяє зменшенню об'єму поверхневого стоку та підвищенню локальної водоутримувальної здатності [18]. Емергійна вартість утримання води в межах таких систем обчислюється за формулою:

$$Em_{WR} = \sum_i (R_{wri} \times 0.001 \times R_f) \times UEV_{ws}, \quad (5)$$

де: Em_{WR} – емергія, необхідна для акумуляції води в субстраті зелених конструкцій (sej/м²/рік); R_{wri} – обсяг затриманої дощової води конструкцією i-го типу (г/м²/добу); R_f – кількість днів із опадами протягом року (днів/рік); UEV_{ws} – емергійне значення для утримання 1 кг води (sej/кг).

Регулювання мікроклімату. Зелені конструкції впливають на мікроклімат шляхом випаровування води, охолодження поверхонь і підвищення відносної

вологості повітря. Енергія, що витрачається на випаровування води, розглядається як індикатор впливу на мікрокліматичні умови. Емергійна оцінка мікрокліматичної регуляції визначається наступним чином:

$$Em_{ET} = \sum_i (E_{tri} \times \rho \times 1{,}000) \times UEV_{mr}, \quad (6)$$

де: Em_{ET} – емергія, що відповідає за регуляцію мікроклімату (sej/м²/рік); E_{tri} – річний обсяг випаровування в конструкції *i*-го типу (мм/рік); ρ – густина води (кг/м³); 1,000 – коефіцієнт перерахунку з кг в г; UEV_{mr} – одинична емергія водяної пари (sej/г).

Поповнення ґрунтових вод. Зелені конструкції сприяють поповненню та підтримці ґрунтових вод через інфільтрацію опадів, взаємодію поверхневих і підземних вод та регулювання зливових стоків. Дощові сади та проникні зелені зони забезпечують надходження води у водоносні горизонти, що посилюється проникністю субстрату та активністю кореневих систем. Емергійна оцінка цього внеску проводиться за формулою:

$$Em_{gw} = \sum (R_i \times \rho \times G \times k_i) \times UEV_{gw}, \quad (7)$$

де: Em_{gw} – емергія, що відповідає за поповнення підземних вод (sej/м²/рік); R_i – кількість опадів у зоні впливу і-ї конструкції (м/рік); G – вільна енергія Гіббса (Дж/г); k_i – коефіцієнт інфільтрації для конкретного типу зеленої конструкції; UEV_{gw} – емергійне значення для підземних вод (sej/Дж).

Утримання ґрунту в зелених конструкціях. Взаємозв'язок біорізноманіття та ерозії ґрунтів є багатофакторним. Щорічно на планеті втрачається близько 2,8 т ґрунту на гектар [19]. У міському середовищі зелені конструкції ефективно протидіють ерозії: коренева система підвищує структурну стійкість ґрунту, а надземні частини рослин зменшують інтенсивність опадів, захищаючи слабкі рослини та запобігаючи вимиванню пухких шарів. Кількісна оцінка цієї екосистемної послуги проводиться за формулою:

$$Em_{er} = (S_{er} - R_{er}) \times 10^{-3} \times UEV_C, \quad (8)$$

де: Em_{er} – емергійне значення утримання ґрунту (sej/м²/рік); S_{er} – потенційна ерозія ґрунту в системі зелених конструкцій (т/км²); R_{er} – фактична ерозія ґрунту (т/км²); 10^{-3} – коефіцієнт перерахунку з г у кг; UEV_C – питома емергія ґрунту (sej/кг).

Цей підхід дозволяє кількісно визначити внесок зелених конструкцій у стабілізацію ґрунтового покриву та мінімізацію втрат ґрунту в урбанізованих середовищах.

1.2. Вплив на стан здоров'я населення та біорізноманіття

Вплив забруднення повітря. У минулому для оцінки впливу шкідливих викидів на навколишнє середовище застосовувалися різноманітні методи. Водночас доцільно інтегрувати підхід прямого емергійного обліку в методологію, здатну оцінювати як екологічні витрати на шкоду довкіллю, так і вплив на здоров'я людей з точки зору емергії [20]. Рамкова методика Eco-Indicator 99 передбачає кількісну оцінку шкоди для здоров'я людини через *DALY* та шкоди екосистемам за допомогою *PDF*. Цей підхід став основою для пізніших методик *LCA* [21].

У цьому дослідженні для оцінки ролі зелених конструкцій у покращенні якості повітря застосовано адаптовану методику, яка відображає зниження негативного впливу на здоров'я людей та стан біорізноманіття.

Параметр зменшення шкоди для здоров'я людей обчислюється за допомогою рівняння:

$$Em_{HH} = \sum_i (P_i \times 10^{-3} \times DALY_i) \times UEV_{health}, \quad (9)$$

де: Em_{HH} – емергійна оцінка ресурсів, необхідних для зменшення шкоди здоров'ю людей (sej/m²/рік); P_i – здатність зеленої конструкції поглинати *i*-й забруднювач повітря (г/м²/рік); $DALY_i$ – втрати здоров'я людини через *i*-й забруднювач (людина·рік/кг); 10^{-3} – коефіцієнт перерахунку з г у кг; UEV_{health} – одинична емергійна вартість для охорони здоров'я (sej/особа/рік).

Показник зменшення деградації якості екосистем розраховується за наступним рівнянням:

$$Em_{EQ} = \sum_i (P_i \times 10^{-3} \times PDF_i) \times UEV_{PDF}, \quad (10)$$

де: Em_{EQ} – емергія, необхідна для зменшення шкоди від деградації якості екосистеми (sej/m²/рік); PDF_i – потенційно зникла фракція видів, спричинена *i*-м забруднювачем (м²·рік/кг); UEV_{PDF} – середнє одиничне емергетичне значення біомаси екосистеми (sej/м²/рік).

Загальна оцінка послуги очищення повітря:

$$Em_{AP} = Em_{HH} + Em_{EQ}. \quad (11)$$

Цей підхід дозволяє інтегрувати внесок зелених конструкцій у покращення міського середовища, оцінюючи одночасно вигоди для здоров'я населення та екосистемних компонентів.

Наслідки глобального потепління. Глобальна зміна клімату проявляється підвищенням середньорічних температур, посиленням кислотних опадів та руйнуванням озонового шару, при цьому найбільшу загрозу для здоров'я людини становить глобальне потепління. Зелені конструкції секвеструють атмосферний вуглець, пом'якшуючи вплив змін клімату та підтримуючи природні механізми регулювання. Обсяг цієї екосистемної послуги оцінюють за емергетичним підходом:

$$Em_{CRHH} = \sum_i (P_{csi} \times 10^{-3} \times DALY_{CSHHi}) \times UEV_{health}, \quad (12)$$

де Em_{CRHH} – емергія, необхідна для пом'якшення наслідків глобального потепління для здоров'я людини (sej/м²/рік); P_{csi} – річна кількість парникових газів, поглинутих *i*-ю складовою зелених конструкцій (г/м²/рік); $DALY_{CSHHi}$ – рік життя з поправкою на інвалідність, втрачений через вплив *i*-го парникового газу (людина·рік/кг); UEV_{health} – одинична емергійна вартість охорони здоров'я людини (sej/особа/рік).

Вплив шумового забруднення на здоров'я. Шумове забруднення у міському середовищі, зумовлене транспортним рухом, будівельною діяльністю та різними соціальними процесами, є значним фактором ризику для фізичного та психологічного здоров'я населення. Зелені конструкції здатні зменшувати рівень шумового впливу шляхом поглинання, відбиття та заломлення звукових хвиль. Рослинність впливає на акустичне середовище за трьома основними механізмами: поглинання звуку, коли звукові хвилі проходять крізь рослинний

шар; дифузія або розсіювання звуку, що виникає при взаємодії хвиль із листям, гілками та стеблами; відбиття звуку назад у простір, що знижує рівень енергії звукової хвилі, що досягає навколишніх об'єктів [22].

Застосування рослинності на фасадах будівель підвищує ефективність акустичного пом'якшення за рахунок численних відбиттів звукових хвиль, тоді як у відкритих просторах ефекти поглинання та дифузії сприяють зменшенню негативного впливу звукових відбиттів від земної поверхні.

Емергетичне визначення цієї екосистемної послуги здійснюється за формулою:

$$Em_{NHH} = \sum_i (N_{hai} \times DALY_i) \times UEV_{health}, \quad (13)$$

де Em_{NHH} – емергія, що відображає необхідні витрати для пом'якшення впливу шуму на здоров'я людини (sej/м²/рік); N_{hai} – ефективність i-ї компоненти зеленої конструкції у пом'якшенні шумового забруднення (дБ/м²); $DALY_i$ – втрати здоров'я через вплив шумового забруднення (людина·рік/дБ); UEV_{health} – одинична емергійна вартість охорони здоров'я людини (sej/особа).

1.3. *Екосистемні диспослуги*

Зелені відходи в зелених конструкціях. Після скошування трав'яного покриву в різних типах зелених конструкцій утворюються зелені відходи незалежно від способу проведення робіт – механічного чи ручного. Кількісну оцінку цих відходів здійснюють за допомогою формули:

$$Em_{GW} = D_{cost} \times EMR, \quad (14)$$

де: Em_{GW} – емергія зелених відходів (sej/м²/рік); D_{cost} – вартість збору та утилізації зелених відходів у межах GBI ($/м²/рік); EMR – одиничне емергійне значення утилізації відходів через трудові витрати (sej/$).

Пошкодження інфраструктури в зелених конструкціях. Серед екосистемних диспослуг зелених конструкцій варто виділити фізичне ушкодження міської інфраструктури внаслідок росту кореневої системи. На зелених дахах коріння трав і чагарників може проникати в гідроізоляційні шари, спричиняючи тріщини та пошкодження покриттів. У зелених стінах ліани створюють тиск на фасад, що призводить до відшарування облицювання та пошкодження герметиків. На наземних ділянках коріння дерев і чагарників, спрямоване до вологи й поживних речовин під твердими покриттями, здатне деформувати асфальт або бетон, утворюючи тріщини та підняття.

Для кількісної оцінки таких ушкоджень застосовують формулу:

$$Em_{IR} = ID \times UEV_{IR}, \quad (15)$$

де: Em_{IR} – емергійне значення, необхідне для усунення пошкоджень інфраструктури (sej/м²/рік); ID – кількість ушкоджень покриття чи фасаду в межах зелених конструкцій (г/м²/рік); UEV_{IR} – одиничне емергійне значення матеріалу інфраструктури (sej/г).

Результати та їх обговорення

Емергійна вартість будівництва та обслуговування зелених конструкцій. Оцінювання енергетичної доцільності міських зелених конструкцій потребує аналізу ресурсів на всіх етапах їх життєвого циклу. У межах емергійного

підходу ресурси класифікуються як відновлювані (сонячна енергія, опади) та невідновлювані (будівельні матеріали, енергія, праця, добрива, вода тощо). На прикладі інтенсивного зеленого даху встановлено, що частка відновлюваних ресурсів у структурі емергії становить лише ~0,02%, що свідчить про домінування антропогенних вкладень. Основне джерело відновлюваної енергії – атмосферні опади. Серед невідновлюваних ресурсів переважають мінеральні матеріали (пісок, перліт, ПГС) та верхній шар ґрунту, емергійна вартість якого сягає $7{,}04\times10^{12}$ sej/м²·рік.

У зелених стінах застосовуються легші субстрати з меншою водоємністю, що знижує витрати, але обмежує видовий склад та екосистемні функції. Для дощових садів характерне використання щебеню і гравію, які забезпечують фільтрацію, акумуляцію опадів і розвантаження зливової системи. Порівняльний аналіз показує, що оптимізація матеріалів, зокрема їх заміна на локальні або відновлювані, дозволяє знизити енерговитрати. Емергійний підхід дає змогу виявити ресурси з найвищим енергетичним навантаженням і сформувати рекомендації для екологічно ефективного проєктування.

Аналіз переваг зелених конструкцій за емергійними показниками. У межах дослідження було здійснено порівняльну емергійну оцінку екосистемних послуг, що генеруються різними типами зелених конструкцій у міському середовищі. Отримані результати наведено в таблиці 1, де відображено емергійні значення основних екосистемних функцій на одиницю площі.

Таблиця 1. Емергійні значення екосистемних послуг та пов'язані витрати на здоров'я людини і біорізноманіття для різних зелених конструкцій, sej/м²/рік

Екосистемні послуги	Параметр	Тип зелених конструкцій		
		Зелений дах	Дощовий сад	Зелена стіна
Чиста первинна продуктивність	Em_{NPP}	$1{,}08\times10^{14}$	$9{,}20\times10^{13}$	$2{,}57\times10^{12}$
Секвестрація вуглецю	Em_{CS}	$2{,}55\times10^{12}$	$1{,}33\times10^{12}$	$6{,}97\times10^{8}$
Акумуляція води в ґрунті	Em_{WR}	$2{,}54\times10^{8}$	$8{,}05\times10^{10}$	$1{,}33\times10^{10}$
Регулювання мікроклімату	Em_{ET}	$1{,}79\times10^{7}$	$4{,}04\times10^{9}$	$3{,}64\times10^{10}$
Зменшення ерозії ґрунту	Em_{er}	-	$5{,}24\times10^{11}$	-
Сумарна екосистемна послуга (з *NPP*)	$\mathrm{Max}(Es_i)$	$1{,}08\times10^{14}$	$9{,}20\times10^{13}$	$2{,}57\times10^{12}$
Сумарна екосистемна послуга (без *NPP*)	ΣEs_i	$2{,}55\times10^{12}$	$1{,}94\times10^{12}$	$5{,}05\times10^{10}$
Необхідні витрати на шкоду здоров'ю та біорізноманіттю				
Збитки від забруднення повітря	Em_{AP}	$3{,}62\times10^{10}$	$1{,}60\times10^{11}$	$2{,}57\times10^{10}$
Збитки від глобальної зміни клімату	Em_{CRHH}	$4{,}60\times10^{9}$	$2{,}45\times10^{9}$	$1{,}26\times10^{6}$
Збитки від шумового забруднення	Em_{NHH}	-	-	$5{,}77\times10^{12}$
Сумарні необхідні витрати на шкоду здоров'ю та біорізноманіттю	$\Sigma E_{DALY+PDF}$	$3{,}62\times10^{10}$	$1{,}60\times10^{11}$	$5{,}79\times10^{12}$

Найвищі сумарні значення екосистемних послуг (включно з *NPP*) зафіксовані для зелених дахів – $1{,}08\times10^{14}$ sej/м²·рік, що вказує на їх багатофункціональний потенціал. Для дощових садів цей показник становить $9{,}20\times10^{13}$ sej/м²·рік, а для зелених стін – лише $2{,}57\times10^{12}$ sej/м²·рік. При порівнянні сумарної екосистемної послуги без урахування *NPP*, зберігається розподіл*: зелений дах > дощовий сад > зелена стіна*. Найвищий потенціал поглинання вуглецю спостерігається у зелених дахів – $2{,}55\times10^{12}$ sej/м²·рік. Порівнянний рівень демонструють дощові сади ($1{,}33\times10^{12}$ sej/м²·рік). Натомість зелені стіни мають значно нижчий показник – лише $6{,}97\times10^{8}$ sej/м²·рік, що пояснюється обмеженим об'ємом субстрату, специфічною вертикальною геометрією та менш розвиненою фотосинтетичною активністю озеленення.

Серед усіх типів конструкцій зелені стіни демонструють найвищий потенціал мікрокліматичної регуляції – $3{,}64\times10^{10}$ sej/м²·рік. Це значення перевищує відповідні показники для дощових садів ($4{,}04\times10^{9}$) і зелених дахів ($1{,}79\times10^{7}$). Такий результат зумовлений щільною вертикальною поверхнею озеленення, що забезпечує ефективне затінення фасаду, зменшення теплового навантаження на будівлю та посилене випаровування з вертикальних площин. Однак, попри високі емергійні показники, ефективність зелених стін значною мірою залежить від наявності систем зрошення та виду рослинності. Дощові сади мають найвищу здатність до акумулювання дощової води ($8{,}05\times10^{10}$ sej/м²·рік), що обумовлено глибоким фільтраційним шаром і повільним поверхневим стоком. Для зелених дахів цей показник становить $2{,}54\times10^{8}$ sej/м²·рік, а для зелених стін – $1{,}33\times10^{10}$ sej/м²·рік.

Незважаючи на нижчі агреговані значення екосистемних послуг, зелені стіни демонструють виняткову ефективність у зниженні шумового забруднення. За показником емергійних витрат на зменшення шкоди від шуму цей тип конструкції має найвищий результат серед усіх: $5{,}77\times10^{12}$ sej/м²·рік, у той час як зелені дахи та дощові сади за цим показником не зазначені. Така шумоізоляційна функція зелених стін особливо цінна в умовах щільної міської забудови, де зниження рівня акустичного навантаження має прямий позитивний ефект на здоров'я людини.

Оцінка диспослуг зелених конструкцій. У практиці екосистемного управління важливо враховувати не лише користь, але й потенційні негативні наслідки (диспослуги), що супроводжують функціонування зелених конструкцій. Таблиця 2 демонструє, що найбільші емергійні витрати пов'язані з утилізацією зелених відходів, особливо для зелених дахів ($4{,}66\times10^{13}$ sej/м²/рік), що пояснюється потребою регулярного скошування й вивезення біомаси.

Таблиця 2. Емергійна оцінка екосистемних диспослуг зелених конструкцій, sej/м²/рік

Екосистемні диспослуги	Зелений дах	Дощовий сад	Зелена стіна
Зелені відходи	$4{,}86\times10^{13}$	$1{,}58\times10^{13}$	$2{,}36\times10^{12}$
Пошкодження інфраструктури	-	-	$8{,}91\times10^{13}$
Сумарна величина диспослуг	$4{,}59\times10^{13}$	$1{,}41\times10^{13}$	$9{,}16\times10^{13}$

Для зелених стін характерна висока енергетична вартість інфраструктурного обслуговування, пов'язана зі складною конструкцією, необхідністю спеціального обладнання та обмеженим доступом до вертикальних поверхонь. Обслуговування таких систем часто потребує риштувань або висотного спорядження, що підвищує витрати. У дощових садах основні диспослуги пов'язані з періодичним очищенням від наносів і біомаси, проте їхній загальний емергійний слід є нижчим.

Економічна ефективність зелених стін у зниженні шумового навантаження на прикладі типових міських конфігурацій. Серед досліджених зелених конструкцій зелені стіни продемонстрували найвищі емергійні витрати на зниження шуму ($5{,}77\times10^{12}$ sej/м²·рік), що свідчить про їхню ефективність у покращенні акустичного середовища міста. Для детального аналізу розглянуто два типові багатоквартирні будинки в Україні: шестиповерхові, по 48 квартир, розташовані у вуличному каньйоні з трафіком 20 000 авт./добу. В обох випадках оцінено вплив зелених стін на фасаді внутрішнього двору з висотою 3 м (58 м² покриття) та 19,2 м (369 м²). Вартість установки становить 500 €/м² (термін служби 10 років), щорічне обслуговування – 25 €/м².

Оцінка зниження шумового навантаження за допомогою зеленої стіни проводилась на основі методики HEATCO [22], яка передбачає економічну оцінку шумового дискомфорту на рівні 10,095 євро/особу/дБ(А)/рік для шуму нижче 71 дБ(А). Естетичний ефект від наявності рослинного фасаду оцінювався у 5,8 євро на домогосподарство на рік, що еквівалентно приблизно 2,4 євро на особу на рік. Обидва показники були приведені до значень 2025 року шляхом коригування за індексом споживчих цін, який використовується як базовий рік аналізу.

Загальна кількість мешканців у вибраних будівлях, які отримують вигоду від зелених стін, становить приблизно 115 осіб (48 квартир, у середньому 2,4 особи на квартиру). Для малої стіни висотою 3 м прямий візуальний контакт з озелененням забезпечує перевагу лише одній квартирі у протилежному будинку, тоді як у варіанті з повним озелененням висотою 19,2 м таких квартир – шість. Внаслідок цього щорічна економічна вигода від шумозахисної функції становить 56,01 євро на особу для конфігурації з 3-метровою стіною та 51,03 євро на особу для конфігурації з висотою 19,2 м. Естетичні вигоди для обох варіантів оцінюються як 2,47 євро на особу на м² озелененого фасаду.

У табл. 3 узагальнено результати розрахунків співвідношення вигод і витрат для двох імітованих архітектурних конфігурацій багатоквартирних будинків, що відображають вплив зеленої стіни на зниження шумового навантаження та естетичні вигоди для мешканців.

Розрахунки співвідношення вигод до витрат свідчать, що в обох випадках переваги суттєво перевищують витрати. Для меншої зеленої стіни загальні вигоди становлять 18 867 євро, тоді як витрати – 3 495 євро. Для більшої конфігурації з фасадом 369 м² вигоди становлять 120 458 євро при витратах 22 235 євро. Варто зазначити, що з урахуванням акустичної ефективності зелена стіна, меншої висоти (3 м) демонструє кращі результати шумопоглинання (внаслідок розташування на рівні основних джерел звуку), що забезпечує їй вищу ефективність у контексті вартості вигоди. Це свідчить про необхідність адаптації параметрів конструкції до конкретних просторових умов для досягнення максимального результату.

Таблиця 3. Розрахунок співвідношення вигод і витрат для двох імітованих проєктів зелених стін різної висоти (3 м та 19,2 м)

Тип конструкції	Площа	Переваги (EUR)	Витрати (EUR)
Зелена стіна, висотою 3 м	58 м²		
– Переваги загасання шуму		1 932	
– Естетичні та функціональні переваги		16 935	
– Інвестиційні витрати			3 301
– Витрати на утримання			194
Підсумок		*18 867*	*3 495*
Зелена стіна, висотою 19,2 м	369 м²		
– Переваги загасання шуму		1 761	
– Естетичні та функціональні переваги		118 698	
– Інвестиційні витрати			20 999
– Витрати на утримання			1 236
Підсумок		*120 458*	*22 235*

Висновки

Результати дослідження підтверджують ефективність зелених конструкцій як важливого елементу сталого міського розвитку, здатного забезпечувати значний обсяг екосистемних послуг – від секвестрації вуглецю до шумозниження. Комплексна емергійна оцінка дозволила кількісно порівняти різні типи зелених рішень, виявивши, що зелені дахи мають найвищі показники сумарних екосистемних вигод, тоді як зелені стіни – найвищу ефективність у зниженні шумового забруднення. Водночас встановлено, що потенційні диспослуги, зокрема зелені відходи та пошкодження інфраструктури, можуть суттєво впливати на загальну екологічну вартість конструкцій. Запропонований емергійний підхід дозволяє враховувати як вигоди, так і ризики функціонування зелених систем у міському середовищі, що є важливим для прийняття збалансованих рішень у плануванні та управлінні міською зеленою інфраструктурою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Karunaratne, T.L.W.; Chow, C.L. (2022). Fire Spread along Vertical Greenery Systems from Window Ejected Flame: A Study Based on a Fire Dynamic Simulator Model. *J. Build. Eng.*, *62*, 105359, doi:10.1016/j.jobe.2022.105359.
2. Pichlhöfer, A.; Korjenic, A.; Sulejmanovski, A.; Streit, E. (2023). Influence of Facade Greening with Ivy on Thermal Performance of Masonry Walls. *Sustainability*, *15*, 9546, doi:10.3390/su15129546.
3. Bagheri Moghaddam, F.; Fort Mir, J.M.; Navarro Delgado, I.; Redondo Dominguez, E. (2021). Evaluation of Thermal Comfort Performance of a Vertical Garden on a Glazed Façade and Its Effect on Building and Urban Scale, Case Study: An Office Building in Barcelona. *Sustainability*, *13*, 6706, doi:10.3390/su13126706.
4. Kim, H.; Oh, K.; Yoo, I. (2023). Analysis of Spatial Characteristics Contributing to Urban Cold Air Flow. *Land*, *12*, 2165, doi:10.3390/land12122165.

5. Lin, H.; Ni, H.; Xiao, Y.; Zhu, X. (2023). Couple Simulations with CFD and Ladybug + Honeybee Tools for Green Façade Optimizing the Thermal Comfort in a Transitional Space in Hot-Humid Climate. *J. Asian Archit. Build. Eng.*, *22*, 1317–1342, doi:10.1080/13467581.2022.2081574.
6. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2023). Problems of Improving the Terminology and Modern Classification of "Green" Constructions for the Creation of Ukrainian "Green" Standards. *Collect. Sci. Publ. NUS*, *493*, 194–204, doi:10.15589/znp2023.4(493).26.
7. Kravchenko, M.; Trach, Y.; Trach, R.; Tkachenko, T.; Mileikovskyi, V. (2024). Improving the Efficiency and Environmental Friendliness of Urban Stormwater Management by Enhancing the Water Filtration Model in Rain Gardens. *Water*, *16*, 1316, doi:10.3390/w16101316.
8. Tkachenko, T.; Kravchenko, M.; Vasylenko, L.; Shumbar, K.; Shcherbak, A.; Zozulya, S. (2024). «Green» Structures in the Urbanized Environment: Studying the Impact of «green» Roofs on Environmental Parameters and Rainwater Quality. Bibliographic Review. *Probl. Water Supply Sewerage Hydraul.*, 48–64, doi:10.32347/2524-0021.2024.46.48-64.
9. Prudencio, L.; Null, S.E. (2018). Stormwater Management and Ecosystem Services: A Review. *Environ. Res. Lett.*, *13*, 033002, doi:10.1088/1748-9326/aaa81a.
10. Blanco, J.; Dendoncker, N.; Barnaud, C.; Sirami, C. (2019). Ecosystem Disservices Matter: Towards Their Systematic Integration within Ecosystem Service Research and Policy. *Ecosyst. Serv.*, *36*, 100913, doi:10.1016/j.ecoser.2019.100913.
11. Tian, Y.; Wu, H.; Zhang, G.; Wang, L.; Zheng, D.; Li, S. (2020). Perceptions of Ecosystem Services, Disservices and Willingness-to-Pay for Urban Green Space Conservation. *J. Environ. Manage.*, *260*, 110140, doi:10.1016/j.jenvman.2020.110140.
12. Saco, P.M.; McDonough, K.R.; Rodriguez, J.F.; Rivera-Zayas, J.; Sandi, S.G. (2021). The Role of Soils in the Regulation of Hazards and Extreme Events. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.*, *376*, 20200178, doi:10.1098/rstb.2020.0178.
13. Kravchenko, M.V.; Tkachenko, T.M. (2024). Calculation of the Ecological and Economic Effect of Collecting Rainwater with «green» Roofs. *Environ. Saf. Nat. Resour.*, *49*, 34–48, doi:10.32347/2411-4049.2024.1.34-48.
14. Odum, H.T. (1996). *Environmental Accounting: EMERGY and Environmental Decision Making*; Wiley: New York, NY, ISBN 978-0-471-11442-0.
15. Duan, N.; Liu, X.D.; Dai, J.; Lin, C.; Xia, X.H.; Gao, R.Y.; Wang, Y.; Chen, S.Q.; Yang, J.; Qi, J. (2011). Evaluating the Environmental Impacts of an Urban Wetland Park Based on Emergy Accounting and Life Cycle Assessment: A Case Study in Beijing. *Ecol. Model.*, *222*, 351–359, doi:10.1016/j.ecolmodel.2010.08.028.
16. Song, X.; Lv, X.; Li, C. (2015). Willingness and Motivation of Residents to Pay for Conservation of Urban Green Spaces in Jinan, China. *Acta Ecol. Sin.*, *35*, 89–94, doi:10.1016/j.chnaes.2015.06.003.
17. Chapin, F.S.; Eviner, V.T. (2007). Biogeochemistry of Terrestrial Net Primary Production. In *Treatise on Geochemistry*; Elsevier, pp. 1–35 ISBN 978-0-08-043751-4.
18. Kravchenko, M.; Wrzesiński, G.; Pawluk, K.; Lendo-Siwicka, M.; Markiewicz, A.; Tkachenko, T.; Mileikovskyi, V.; Zhovkva, O.; Szymanek, S.; Piechowicz, K. (2024). Improving Urban Stormwater Management Using the Hydrological Model of Water Infiltration by Rain Gardens Considering the Water Column. *Water*, *16*, 2339, doi:10.3390/w16162339.
19. Global Soil Erosion - ESDAC - European Commission Available online: https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/global-soil-erosion (accessed on 19 August 2025).
20. Liu, G.; Yang, Z.; Chen, B.; Ulgiati, S. (2011). Monitoring Trends of Urban Development and Environmental Impact of Beijing, 1999–2006. *Sci. Total Environ.*, *409*, 3295–3308, doi:10.1016/j.scitotenv.2011.05.045.
21. Huijbregts, M.A.J.; Steinmann, Z.J.N.; Elshout, P.M.F.; Stam, G.; Verones, F.; Vieira, M.; Zijp, M.; Hollander, A.; Van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A Harmonised Life Cycle Impact Assessment Method at Midpoint and Endpoint Level. *Int. J. Life Cycle Assess.*, *22*, 138–147, doi:10.1007/s11367-016-1246-y.

22. Veisten, K.; Smyrnova, Y.; Klæboe, R.; Hornikx, M.; Mosslemi, M.; Kang, J. (2012). Valuation of Green Walls and Green Roofs as Soundscape Measures: Including Monetised Amenity Values Together with Noise-Attenuation Values in a Cost-Benefit Analysis of a Green Wall Affecting Courtyards. *Int. J. Environ. Res. Public. Health*, *9*, 3770–3788, doi:10.3390/ijerph9113770.

Стаття надійшла до редакції 26.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 18.09.2025

The article was received 26.06.2025 and was accepted after revision 18.09.2025

Шумбар Костянтин Вікторович
аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-0201-2142 ***e-mail:*** k.w.shumbar@gmail.com

Кравченко Марина Василівна
д.т.н., доцентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0428-6440 ***e-mail:*** kravchenko.mv@knuba.edu.ua

Василенко Леся Олексіївна
к.т.н., доцентка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0428-6440 ***e-mail:*** vasylenko.lo@knuba.edu.ua

Ткаченко Тетяна Миколаївна
д.т.н., професорка, завідувачка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2105-5951 ***e-mail***: tkachenko.tm@knuba.edu.ua

Волошкіна Олена Семенівна
д.т.н. наук, професорка кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3671-4449 ***e-mail:*** voloshkina.os@knuba.edu.ua

Щербак Андрій Ігорович
аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-4594-6412 ***e-mail:*** andron.vr@gmail.com

УДК 662.81

Petro Kyriienko[1], PhD, docent, Department of Ecology Technogenic Safety
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8116-7448 ***e-mail:*** p.kirienko@khai.edu

Andrii Melnykov[2], PhD, Department of Ecology Technogenic Safety
e-mail: atlonpc@ukr.net

Oleksandr Betin[1], Dr, Professor, Department of Ecology Technogenic Safety
e-mail: o.betin@khai.edu

Kateryna Msallam[1], PhD, docent, Department of descriptive geometry and computer modeling
e-mail: k.msallam@khai.edu

[1]National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine
[2]Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problem, Kharkiv, Ukraine

COMBUSTION OF PELLETS FROM AGRICULTURAL WASTE

Abstract. *Agricultural waste is a renewable source of energy when it is burned in the form of pallets. When pellets and briquettes are burned, pollutants are released into the environment and waste is generated in the form of ash. Equipping power plants with modern treatment facilities allows reducing atmospheric pollution and reducing the environmental load on the environment. In this work, the processes of formation of pollutants in the process of burning pallets are theoretically considered and the formation of ash and slag waste, which cannot be used as a fertilizer, but needs to be processed or removed in another way, is investigated. Pre-treatment by grinding the slag formed after combustion is an additional technological operation that can be avoided if the correct combustion technology is observed, raw material control, quality control and storage of the components of briquettes and pellets. Studying the composition of the starting raw materials for pellet production is one of the important stages of minimizing slag formation. It should be taken into account that a detailed analysis of the ash composition is an expensive and labor-intensive process that requires expensive equipment. In this case, an important characteristic is the content of silicates in the ash, because it is it that determines the appearance of insoluble slag, which subsequently needs to be dissolved or ground.*
Key words: *grapevine, grape pomace, flax fescue, pellet combustion, carbon, combustion temperature, pollutants, renewable energy sources, agricultural waste.*

П.Г. Кирієнко[1], А.Ю. Мельников[2], О.В. Бетін[1], К.П. Мсаллам[1]

[1]Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", м. Харків, Україна
[2]Науково-дослідна установа "Український науково-дослідний інститут екологічних проблем", м. Харків, Україна

СПАЛЮВАННЯ ПЕЛЕТ З ВІДХОДІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Анотація. *Відходи сільського господарства є відновлюваним джерелом енергії при їх спалюванні у виді пелет. При спалюванні пелет і брикет відбувається викид забруднюючих речовин в навколишнє середовище і утворюються відходи у вигляді золи. У цій роботі теоретично розглянуті процеси утворення забруднюючих речовин у процесі згорання пелет та*

© П.Г. Кирієнко, А.Ю. Мельников, О.В. Бетін, К.П. Мсаллам, 2025

досліджено утворення золошлакових відходів, які не можуть бути використані в якості добрива, а потребують переробки або видалення іншим шляхом. Попередня обробка шляхом подрібнення шлаків, які утворилися після спалювання – це додаткова технологічна операція, якої можна уникнути при дотриманні правильної технології спалювання, контролю вихідної сировини, контролю якості і організації зберігання складових брикет і пелет.

Ключові слова: *виноградна лоза, жмих, костриця, лушпиння соняшнику, спалювання пелет, вуглець, температура горіння, забруднювальні речовини, відновлювані джерела енергії, відходи сільського господарства.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.35-42

Вступ

Спалювання викопного палива (вугілля, сланців, нафти, газу та ін.) призводить до виснаження природних ресурсів Землі, яких за розрахунками "Римського клубу" залишилося на 50-150 років, а урану і торію – на 7000 років (1). Окрім того, в навколишнє середовище викидаються парникові гази та забруднювальні речовини: двоокис вуглецю CO_2, оксиди азоту NO_x, метану CH_4, пари води, а при спалюванні вугілля, сланців утворюється велика кількість шлаків, які необхідно утилізувати.

Для отримання енергоносіїв можна використовувати енергію води (може бути поверхнева, термальна і підземна), колектори, вітроенергетичні установки, геліоустановки, теплові насоси та ін. Але у цьому випадку так само необхідно зважати на екологічне забруднення навколишнього середовища.

Для отримання енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії використовуються відходи сільського господарства: лушпиння соняшнику, кочерижки кукурудзи, костриця льону і конопель, сіно, солома, відходи деревини, лоза винограду, жмих винограду, а також – у перспективі – енергетичні культури (верба, тополя, міскантус тощо). Необхідно із цих відходів одержувати паливні пелети і брикети, які при спалюванні дають більшу енергетичну ефективність, ніж при спалюванні самих відходів. Але при їх спалюванні в атмосферу викидаються забруднювальні речовини. І все ж це відновлювані джерела енергії. Обладнання енергетичних установок сучасними очисними спорудами дозволяє зменшити забруднення атмосфери і знизити екологічне навантаження на навколишнє середовище. За спеціальними технологіями із відходів можна одержувати паливний газ, який не має в своєму складі сірки та інших забруднювальних домішок (2).

Результати досліджень

У статті зосереджено увагу на аналізі спалювання таких видів пелет: пелети із лози винограду + 10 % лушпиння соняшнику; пелети із лози винограду і костриці льону; пелети із лози винограду + жмих.

Параметри процесу спалювання багатокомпонентних пелет в основному залежать від температури і вмісту кисню в газоповітряному середовищі котлоагрегатів. При підвищенні парціального тиску кисню в спалювальній суміші забезпечується більша окиснюваність пелет. Це залежить від площі розділу твердої і газоподібної фаз, а також від газової суміші в котлоагрегаті.

При збільшенні площі поверхні розділу фаз швидкість і глибина процесів горіння збільшується. Це досягається вдосконаленням технології виготовлення пелет (зменшення дисперсності складових, варіація тиску пресування та ін.).

Хімічний склад пелет залежить від (3):

1. Вихідних складових в пелетах (виноградна лоза, оболонки ягід винограду, продукти бродіння винограду, жмих, лушпиння соняшнику, костриця льону і конопель й інші інгредієнти).

2. Умов очищення інгредієнтів пелет від піску, ґрунту, рослин, забруднювальних речовин, які можуть бути в повітрі.

3. Умов транспортування і зберігання складових для виготовлення пелет.

4. Технологічних способів одержання пелет, тиску пресування, подрібнення інгредієнтів, наявності в складових вологи.

5. Вдосконалення технологій та устаткування для спалювання біопалива аграрного походження.

На рисунках 1, 3, 5 представлені двокомпонентні пелети, в склад яких входить виноградна лоза, що виробляється при обрізанні винограду, а також відходи лушпиння соняшнику, костриця льону і жмих, який складається з відходів вичавлювання винограду (кісточки з винограду, виноградні шкірки). За кольором пелети із лози винограду + лушпиння соняшнику та із лози винограду + костриця льону майже не відрізняються, а пелети із лози винограду і жмиху темніші, тому що в них входить жмих, який використовується після бродіння винограду.

На рисунках 2, 4, 6 представлені шлаки після спалювання відповідних пелет. Шлак після спалювання пелет із лози винограду і лушпиння соняшнику дрібний. А в шлаках після спалювання пелет із виноградної лози і жмиху, а також виноградної лози і костриці льону є великі куски шлаку. Це можна пояснити причинами зберігання компонентів на відкритому повітрі, перевезенням насипом та іншими причинами, коли в ці інгредієнти потрапляють забруднювальні речовини, які сприяють утворенню шлаків.

Це ще залежить від місця вироблення пелет. Виноградна лоза, жмих і лушпиння соняшнику виробляються на півдні України, а костриця льону – на півночі України, на південь її треба транспортувати, тому забруднення будуть значними.

Хімічний, а також рентгенофазовий аналіз виноградної лози показав склад цього зразка рослини, таблиця 1.

Рис. 1. Пелети із лози винограду + 10% лушпиння соняшнику	Рис. 2. Шлак після спалювання пелет із лози + 10% лушпиння соняшнику

Рис. 3. Пелети із лози винограду + жмих	Рис. 4. Шлак після спалювання пелет із лози винограду + жмих
Рис. 5. Пелети із лози винограду і костриці льону	Рис. 6. Шлак після спалювання пелет лози винограду і костриці льону

Таблиця 1.

Компоненти	Вміст, мг/кг
Сахароза	5,40
Глюкоза	15,42
Фруктоза	21,57
Транс-ресфератрол	0,45
Транс-*E*-вініферин	0,92
Хлорофіл	18,77
Мінеральні речовини	2,17

Склад сировини для пелет, при їх виготовленні з одного виду рослин залежить від багатьох факторів, зокрема:

1. Агрокліматичні умови зростання.
2. Сорти (зокрема, сорти винограду).
3. Вегетативний період.
4. Характеристика ґрунту.
5. Сприйнятливість до захворювань.

Органічні речовини виноградної лози містять такі елементи:

1 C – вуглець.
2. H – водень.
3. N – азот.
4. O – кисень.

5. P – фосфор.
6. S – сірка.
7. Зольні елементи (K, Ca, Mg, Si, Na, Fe, Al, Cu та інші).

При згорянні елементів лози в кисні повітря утворюються:

– вуглекислий газ

$$\underset{\rightarrow}{CO_2}\begin{cases} C_{(т)} \\ CO_{(г)} \\ CO_{2(г)} \end{cases}$$

– * C (сажа) є продуктом неповного згоряння

$$\underset{\rightarrow}{HO_2}\begin{cases} H_2O_{(г)} \\ H_2O_{(ж)} \end{cases}$$

$$\underset{\rightarrow}{NO_2}\begin{cases} N_{2(г)} \\ NO_{(г)} \\ NO_{2(г)} \\ N_2O_{(г)} \end{cases}$$

– O → кисень речовин бере участь в окисленні компонентів пелет

$$\underset{\rightarrow}{PO_2}P_2O_5$$

$$\underset{\rightarrow}{SO_2}SO_{2(г)}\underset{\rightarrow}{O_2}SO_{3(г)}$$

Інші складові під час окиснення переходять у відповідні оксиди, а при тривалій взаємодії може відбуватися сплавляння оксидів металів та неметалів з утворенням важкорозчинних солей.

Відповідно склад золи буде визначатися наступними чинниками:

1. Складом пелет.
2. Їх структурою – більш пухкі пелети будуть більш рівномірно окиснюватись, відповідно краще виходитимуть гази, буде вища температура горіння. Відповідно буде утворюватися менше солей та краще вигорати вуглець.
3. Часом і температурою, при якій відбуватиметься згоряння, та виходом золи (конструкція печі). Якщо зола буде видалятися із зони горіння, за високих температур не відбуватимуться процеси сплавляння і утворення великих шматків шлаку (5).
4. Технологією спалювання пелет, вироблених з відходів сільськогосподарського виробництва.

Мінеральні речовини у золі виноградної лози представлені у таблиці 2.

Таблиця 2.

Оксид елементу	Вміст, % у перерахунку на оксид
K_2O	52
CaO	15
MgO	6,5
P_2O_5	6,9
SiO_2	5,4
Na_2O	1,7
Fe_2O_3	1,4
Al_2O_3	1,7
C (сажа)	0,8
Інші елементи	8,6

Дослідження складу вихідної сировини для виготовлення пелет є одним із важливих етапів мінімізації утворення шлаку. Треба враховувати, що детальний аналіз складу золи є дорогим та трудомістким процесом, який потребує коштовного обладнання. При цьому важливою характеристикою є вміст силікатів у золі, бо саме він зумовлює появу важкорозчинного шлаку, який у подальшому потрібно розчиняти або подрібнювати. Зважаючи на це, можливо використовувати показники сумарного складу та простіші методи дослідження. А саме як характеристики якості пелет використовувати показники: залишок після прожарювання при 800^0С, нерозчинний у кислоті залишок після прожарювання при 800^0С та нерозчинна у кислоті частка в залишку після прожарювання при 800^0С (6).

Методика вимірювання цих показників полягає у проведенні наступних етапів дослідження: зважування 5 г зразку у порцеляновий тигель; тигель, накритий порцеляновою кришечкою, ставиться у муфельну піч, де поступово нагрівається до 800^0С і витримується при цій температурі протягом 4 годин; після охолодження тигель зважується та розраховується масова частка залишку відносно початкової маси; у тигель додають 20 $см^3$ розчину кислоти азотної 30% мас. та нагрівають до 90^0С; залишають на нагріві на 30 хвилин; знімають з нагріву та охолоджують; фільтрують крізь фільтр беззольний "синя стрічка"; промивають декілька разів дистильованою водою; фільтр згортають, переносять у порцеляновий тигель та накривають кришкою; проводять озолення спочатку на електричній пічці, потім допалюють у муфелі при 800^0С; тигель охолоджують та зважують, розраховують нерозчинний у кислоті залишок після прожарювання та нерозчинну у кислоті частку в залишку після прожарювання (7).

Як показує експериментальне дослідження, результати якого наведені в таблиці, гранули мають значну кількість домішок, що можуть утворювати шлак. Також нерозчинний шлак від спалювання цих гранул спостерігався і в умовах їх використання при спалюванні в печі.

Характеристики паливних гранул та матеріалів для їх виготовлення представлені в таблиці 3.

Таблиця 3.

Проба	Залишок після прожарювання при 800^0С, % мас.	Нерозчинний у кислоті залишок після прожарювання при 800^0С, % мас.	Нерозчинна у кислоті частка в залишку після прожарювання при 800^0С, % мас.
Гранула (лоза + 10% лушпиння соняшнику)	9,4	5,1	54
Гранула (лоза – костриця льону)	4,3	1,2	28
Гранула (лоза – жмих)	6,7	2,9	43
Лоза чиста	1,9	0,27	14,
Жмих минулорічний	4,2	0,62	15

Найбільше нерозчинного залишку утворюється в пелетах із лози + 10% лушпиння соняшнику – 54%, та із пелет лоза + жмих – 43%, а найменше – із пелет з чистої виноградної лози – 14% та з пелет зі жмиху – 15%. Такі дані можна аргументувати тим, що лушпиння соняшнику і жмих привозяться на вироблення пелет і їх зберігання та перевезення можуть відбуватися із забрудненням з навколишнього середовища. А це пил, пісок та інші речовини, які здатні утворювати нерозчинні солі.

Висновки

1. Склад пелет має важливе значення для теплотворної здатності та викидів в навколишнє середовище, а також проблем, пов'язаних з утворенням шлаків.
2. Забруднення навколишнього середовища спричиняють викиди у повітряне середовище газоподібних забруднювальних речовин CO_2, NO_2 та ін.
3. Найбільше нерозчинних домішок (шлаку) утворюється з пелет, виготовлених із лози + 10% лушпиння соняшнику – 54%, та пелет із лози + жмих – 43%, а найменше – із чистої виноградної лози.
4. Необхідність створення спеціальних котлів для спалювання пелет з відходів сільськогосподарської продукції (костриці льону і конопель, виноградної лози, жмиху, лушпиння соняшнику та ін.).
5. Важливою умовою для зменшення забруднення навколишнього середовища є умови зберігання та перевезення складових пелет.
6. В подальшому, необхідним було б проведення хімічного аналізу димових газів, який дав би відсотковий вміст газів, забруднюючих повітряне середовище.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи стійкого розвитку: Навчальний посібник / За загальною редакцією проф. Л.Г. Мельника. – Суми : “Університетська книга”, 2005. – 654 с.
2. Закон України “Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року” від 28.02.2019 №2697-VIII. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17
3. Виробництво енергії з біомаси в Україні: технології, розвиток, перспективи / Ін-т технічної теплофізики НАН України; за ред. Г. Гелетухи. – Київ: Академ періодика, 2022. – 373 с.
4. «Кращі з доступних технологій для житлово-комунального господарства України». Керівництво з відбору технологій / Під редакцією С. Єрмілова. – К.: «Поліграф плюс», 2016. – 134 с.: іл.
5. Гелетуха Г., Крамар В., Епік О., Антощук Т., Тітков В. Комплексний аналіз українського ринку пелет з біомаси / Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellets market. Програма розвитку Організації Об’єднаних Націй, 2016.
6. Б.І. Басок, Б.В. Давиденко, Л.М. Кужель та ін. Особливості процесу спалювання пелет з деревини та соломи в побутовому пальнику. Матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті".
7. Лисенко О.М., Веремійчук Г.М., Сірий О.А. Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 квт. Інститут технічної теплофізики НАН України, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

Стаття надійшла до редакції 10.10.2025 і прийнята до друку після рецензування 11.12.2025

REFERENCES

1. Melnyk, L. H. (Ed.). (2005). *Fundamentals of sustainable development* [Textbook]. Sumy: Universytetska Knyha. [In Ukrainian].
2. Law of Ukraine *On the Basic Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period up to 2030* No. 2697-VIII (2019, February 28). Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2818-17
3. Heletukha, H. (Ed.). (2022). *Energy production from biomass in Ukraine: Technologies, development, prospects*. Kyiv: Akademperiodyka. [In Ukrainian].
4. Yermilov, S. (Ed.). (2016). *Best available technologies for the housing and communal services sector of Ukraine: Technology selection guidelines*. Kyiv: Polihraf Plus. [In Ukrainian].
5. Heletukha, H., Kramar, V., Epik, O., Antoshchuk, T., & Titkov, V. (2016). *Comprehensive analysis of the Ukrainian biomass pellets market*. United Nations Development Programme.
6. Basok, B. I., Davydenko, B. V., Kuzhel, L. M., et al. (n.d.). Features of the combustion process of wood and straw pellets in a domestic burner. In *Proceedings of the 20th International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the 21st Century"*. [In Ukrainian].
7. Lysenko, O. M., Veremiichuk, H. M., & Siryi, O. A. (n.d.). Study of combustion of agricultural biomass pellets in boilers with a capacity up to 25 kW. Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine; National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". [In Ukrainian].

The article was received 10.10.2025 and was accepted after revision 11.12.2025

Кирієнко Петро Григорович
кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут"
Адреса робоча: 61070 Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8116-7448 ***e-mail:*** p.kirienko@khai.edu

Мельников Андрій Юрійович
кандидат технічних наук, Науково-дослідна установа "Український науково-дослідний інститут екологічних проблем"
Адреса робоча: 61165, Україна, м. Харків, вул. Єніна Євгенія, 6
e-mail: atlonpc@ukr.net

Бетін Олександр Володимирович
доктор технічних наук, професор Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут"
Адреса робоча: 61070 Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17
e-mail: o.betin@khai.edu

Мсаллам Катерина Петрівна
кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету "Харківський авіаційний інститут"
Адреса робоча: 61070 Україна, м. Харків, вул. Вадима Манька, 17
e-mail: k.msallam@khai.edu

UDC 620.9:504

Roman Hamotskyi, PhD student
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5469-8606 ***e-mail:*** roman.hamotskyi@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

INTEGRATION OF ENVIRONMENTAL SAFETY INTO MECHANISMS FOR COMBATING ENERGY THREATS TO RESIDENTIAL BUILDINGS

Abstract. *This article explores the integration of environmental safety into mechanisms for countering energy threats to residential buildings, a matter of heightened relevance in the context of full-scale warfare. Widespread attacks on critical infrastructure have led to disruptions in energy supply, increased reliance on emergency power sources, intensified environmental pollution, and the accumulation of hazardous waste, including radiological risks. Under such conditions, ensuring energy stability must be accompanied by ecological responsibility and adherence to the principles of sustainable development. Contemporary approaches to energy efficiency are analysed, with emphasis on those that incorporate environmental consequences and contribute to the resilience of residential infrastructure. Strategic planning is foregrounded, encompassing environmental monitoring, damage assessment, scenario modelling for resilience, and social auditing. The application of the Integrated Environmental Assessment (IEA) methodology is substantiated as a key instrument for developing ecologically balanced response strategies to energy threats in the housing sector. IEA enables the synthesis of multidimensional data on the condition of energy infrastructure, environmental risks, and social impacts, facilitating systemic evaluation under crisis scenarios. The importance of energy supply monitoring is highlighted as a dynamic indicator of building resilience, allowing for the timely identification of critical zones and forecasting of supply disruptions. Infrastructure damage analysis is conducted with consideration of building typologies, materials, degrees of deterioration, and potential environmental impacts, thereby informing the prioritisation of recovery measures. The use of digital tools and artificial intelligence methods is emphasised for the rapid analysis of large data sets, risk prediction, and the organisation of effective crisis response. An ecologically balanced response framework is proposed, incorporating integrated energy-environmental audits, contemporary management models, and intelligent systems. These audits serve not only to assess energy efficiency but also to evaluate the ecological compliance of emergency power sources, ventilation systems, and thermal insulation. Scenario modelling for resilience involves multifactorial analysis across technical, environmental, and social dimensions, enabling the adaptation of response strategies to varying threat levels. Social impact assessment considers population vulnerability, access to essential resources, psychological wellbeing, and institutional trust. This approach not only safeguards basic living conditions during wartime but also lays the foundation for Ukraine's green recovery. The findings may inform the refinement of regulatory frameworks, the development of housing adaptation strategies, and the advancement of environmentally oriented energy policy.*

Key words: *energy security, integrated environmental assessment, residential infrastructure resilience, energy-environmental auditing, green recovery.*

© Р.О. Гамоцький, 2025

Р.О. Гамоцький

Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна

ІНТЕГРАЦІЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ В МЕХАНІЗМИ ПРОТИДІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИМ ЗАГРОЗАМ ЖИТЛОВИМ БУДІВЛЯМ

Анотація. *У статті досліджено інтеграцію екологічної безпеки в механізми протидії енергетичним загрозам житловим будівлям, що набуває особливої актуальності в умовах повномасштабної війни. Масові атаки на критичну інфраструктуру призводять до перебоїв з енергопостачанням, використання аварійних джерел енергії, посилення забруднення довкілля та накопичення небезпечних відходів, включаючи радіаційні ризики. У таких умовах забезпечення енергетичної стабільності має супроводжуватися екологічною відповідальністю та дотриманням принципів сталого розвитку. Проаналізовано сучасні підходи до енергоефективності, які враховують екологічні наслідки та сприяють підвищенню стійкості житлової інфраструктури. Особливу увагу приділено стратегічному плануванню, що включає екологічний моніторинг, аналіз пошкоджень, моделювання сценаріїв стійкості та соціальні аудити. Обґрунтовано застосування методології інтегрованих оцінок впливу (Integrated Environmental Assessment, IEA) як ключового інструменту для формування екологічно збалансованої стратегії реагування на енергетичні загрози в житловому секторі. Методологія IEA дозволяє поєднати багатовимірні дані про стан енергетичної інфраструктури, екологічні ризики та соціальні наслідки, забезпечуючи системну оцінку в умовах кризових сценаріїв. Акцентовано на важливості моніторингу енергопостачання як динамічного індикатора стійкості житлових будівель, що дозволяє оперативно виявляти критичні зони та прогнозувати ризики перебоїв. Аналіз пошкодження інфраструктури здійснюється з урахуванням типології будівель, матеріалів, ступеня зносу та потенційного впливу на довкілля, що сприяє пріоритезації заходів з відновлення. Підкреслено важливість застосування цифрових інструментів і методів штучного інтелекту для оперативного аналізу великих масивів даних, прогнозування ризиків та організації ефективної кризової реакції. Запропоновано концепцію екологічно збалансованого реагування, що передбачає використання інтегрованих екологічно-енергетичних аудитів, сучасних моделей управління та інтелектуальних систем. Інтегровані енергетично-екологічні аудити розглядаються як інструмент оцінки не лише енергоефективності, а й екологічної відповідності аварійних джерел живлення, систем вентиляції та теплоізоляції. Моделювання сценаріїв стійкості включає багатофакторний аналіз, що охоплює технічні, екологічні та соціальні параметри, дозволяючи адаптувати стратегії реагування до різних рівнів загроз. Оцінка соціальних наслідків проводиться з урахуванням вразливості населення, доступу до базових ресурсів, психологічного стану та рівня довіри до інституцій. Такий підхід дозволяє не лише захистити базові умови життя населення в умовах війни, а й закласти основу для зеленого відновлення України. Результати дослідження можуть бути використані для удосконалення нормативно-правових актів, розробки стратегій адаптації житлового фонду до нових викликів та формування екологічно орієнтованої політики в енергетичному секторі.*

Ключові слова: *енергетична безпека, інтегрована екологічна оцінка, стійкість житлової інфраструктури, енергетично-екологічний аудит, зелене відновлення.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.43-56

Вступ

Війна суттєво підвищує ризики для енергетичної та екологічної безпеки житлових будівель. Обстріли, руйнування інфраструктури, перебої з постачанням електроенергії, тепла та води призводять до втрати стабільності енергозабезпечення, а також змушують мешканців використовувати аварійні та менш екологічні джерела енергії. Одночасно вибухи, пожежі, витоки небезпечних речовин і накопичення відходів спричиняють забруднення повітря, води й ґрунтів, що негативно впливає на здоров'я людей і стан довкілля [18].

Руйнування енергетичних об'єктів, складів пального, промислових підприємств призводить до масового потрапляння у повітря, воду та ґрунти токсичних речовин, важких металів, нафтопродуктів, які не лише погіршують якість навколишнього середовища, а й створюють безпосередню загрозу здоров'ю людей [1]. Водночас, масові пожежі, вибухи, використання дизельних генераторів та аварійне спалювання палива різко збільшують викиди парникових газів, зокрема CO_2, NO_x, CH_4, а також дрібнодисперсного пилу, що негативно впливає на якість повітря і сприяє розвитку респіраторних хвороб серед мешканців міст [12]. Особливо небезпечною є загроза радіаційного забруднення, яка виникає у разі пошкодження або загрози аварій на атомних електростанціях, таких як Запорізька АЕС. У такій ситуації радіоактивні речовини можуть поширитися на великі території, створюючи довготривалу небезпеку для здоров'я населення та екосистем.

Внаслідок руйнування будівель накопичуються великі обсяги небезпечних відходів: уламки, змішані з токсичними матеріалами (наприклад, азбестом), які складно утилізувати без шкоди для довкілля. Руйнування зелених зон, парків і лісосмуг поблизу багатоповерхових будинків знижує здатність природного середовища до самоочищення, підвищує рівень пилу, шуму, сприяє ерозії ґрунтів і погіршенню мікроклімату [13].

Енергетичні загрози також набувають особливої гостроти й комплексності. Однією з найсерйозніших небезпек є знищення або пошкодження енергетичної інфраструктури – електростанцій, підстанцій, тепломереж, газопроводів. Масовані атаки чи диверсії на ці об'єкти призводять до масштабних і тривалих відключень електроенергії та тепла, що унеможливлює стабільне функціонування багатоповерхових будинків. У таких умовах мешканці залишаються без світла, опалення та часто без водопостачання, оскільки більшість систем водопідйому та каналізації залежать від електроенергії. Перебої з постачанням палива (газу, вугілля, дизеля) ще більше загострюють ситуацію: дефіцит цих ресурсів унеможливлює роботу котелень та аварійних генераторів, що особливо критично в зимовий період, коли ризик замерзання будинків і систем водопостачання зростає в рази.

Додатковим чинником є зростання аварійності старого житлового фонду: значна частина багатоповерхових будинків була зведена понад 40–60 років тому, а їхній технічний стан часто незадовільний [19]. У разі перебоїв з енергопостачанням такі будівлі стають особливо вразливими до аварій, руйнувань інженерних мереж, проривів труб і навіть пожеж. Це ускладнюється зростанням навантаження на старі інженерні мережі, які часто не пристосовані до роботи в умовах масових руйнувань і перебоїв з енергопостачанням. Пошкодження інженерних мереж ускладнює доступ до чистої води, сприяє забрудненню ґрунтів і підземних вод, підвищує ризик інфекційних захворювань.

Всі перелічені фактори в сукупності створюють серйозні загрози для безпеки, здоров'я та життєзабезпечення мешканців багатоповерхових будинків у воєнний час, а також ускладнюють організацію оперативної допомоги та відновлення інфраструктури. У таких умовах критично важливо розробити ефективні управлінські рішення, які дозволять своєчасно реагувати на аварійні зміни.

Постановка завдання

Метою цього дослідження є обґрунтування необхідності інтеграції екологічної безпеки в механізми реагування на енергетичні загрози житловим будівлям, з урахуванням сучасних викликів, принципів сталого розвитку та потенціалу цифрових технологій в умовах війни. У відповідності із поставленою метою сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати сучасні підходи до забезпечення енергетичної безпеки житлових будівель з урахуванням екологічних наслідків та ризиків, що виникають в умовах воєнних дій;
- оцінити роль екологічного чинника у стратегічному плануванні та прийнятті рішень щодо протидії енергетичним загрозам;
- визначити ефективні практики поєднання енергоефективних заходів з екологічною відповідальністю, що сприяють підвищенню стійкості житлової інфраструктури;
- розглянути можливості застосування цифрових інструментів та штучного інтелекту для моніторингу, аналізу та прогнозування екологічно-енергетичних ризиків;
- запропонувати рекомендації щодо вдосконалення методів реагування, які базуються на екологічно збалансованому та інтегрованому підході до управління ризиками.

Результати досліджень

Війна створює низку серйозних енергетичних і екологічних загроз, які безпосередньо впливають на нормальне функціонування житлових будівель і здоров'я їхніх мешканців. Знищення енергетичної інфраструктури, перебої з постачанням електроенергії, тепла чи води, а також забруднення повітря, води та ґрунтів внаслідок бойових дій чи руйнування промислових об'єктів підривають стабільність і безпеку. Саме тому надзвичайно важливо одночасно відстежувати як енергетичні, так і екологічні загрози, адже вони є запорукою підтримки базових умов життя, збереження здоров'я населення як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі. Для ефективного управління варто насамперед детально проаналізувати ризики, які суттєво впливають як на безпеку мешканців, так і на довкілля під час війни.

Методологія інтегрованих оцінок впливу на довкілля (Integrated Environmental Assessment, IEA) забезпечує комплексний підхід до аналізу та управління стійкістю території та об'єктів (рис. 1). Вона забезпечує одночасне дослідження стану енергетики, екологічної ситуації, ризиків для здоров'я населення та соціально-економічних факторів. Особливість IEA створюється в поєднанні кількісних та якісних методів аналізу, що дозволяє виявити

взаємозв'язки між різними сферами діяльності – наприклад, як енергетичні рішення впливають на довкілля, здоров'я людей і соціальну безпеку. У зв’язку з цим необхідно визначити, які саме методи оцінки енергетичної безпеки доцільно застосовувати під час воєнних загроз і які екологічні чинники можуть бути враховані в цьому процесі.

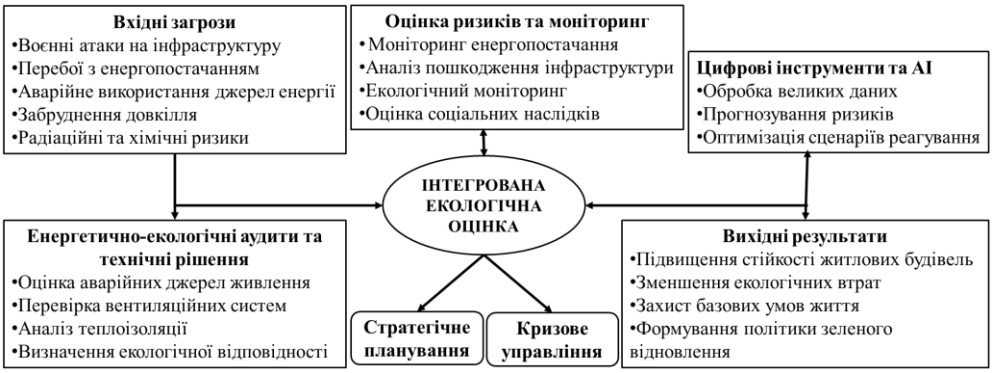


Рис. 1. Екологічна оцінка в системі енергозабезпечення житлових будівель в умовах воєнних загроз

Моніторинг енергопостачання. Моніторинг енергопостачання полягає у систематичному відстеженні частоти, тривалості та масштабів відключення електроенергії, тепла й газу, що дозволяє оперативно виявляти найуразливіші райони та періоди найбільшого дефіциту ресурсів. Особливу роль відіграє аналіз аварійних графіків відключень, які впроваджуються у відповідь на атаки чи пошкодження енергетичної інфраструктури. Такий підхід дає змогу не лише фіксувати масштаби проблеми, а й планувати заходи для мінімізації негативних наслідків для мешканців, своєчасно запускати резервні джерела енергії та координувати відновлювальні роботи [1].

Через різку зміну структури енергоспоживання, відключення централізованого енергопостачання, часто масово підвищується використання дизель-генераторів, твердого палива чи інших аварійних джерел енергії. Це супроводжується зростанням викидів шкідливих речовин у повітря (CO_2, NOx, сажі, чадного газу), що погіршує якість атмосфери в житлових районах. Окрім аварійних джерел енергії, резервні системи через підвищене напруження також підвищують ризики забруднення повітря. Додатково, в періоди відключень може підвищуватись шумове навантаження та ризик витоків пального. Зіставлення даних про відключення енергії з показниками якості повітря чи рівнем шуму дозволяє встановити, коли і де зростає екологічне навантаження на довкілля. Завдяки моніторингу можна прогнозувати обсяги споживання палива та ресурсів, що спричиняють додаткові викиди. Аналізуючи, як змінюється екологічна ситуація після відновлення централізованого енергопостачання, можна оцінити ефективність енергетичних рішень з точки зору зменшення негативного впливу на довкілля. Регулярний моніторинг дозволяє спрогнозувати на майбутнє, за яких умов і в яких районах можуть виникати певні екологічні проблеми, пов’язані з аварійним енергоспоживанням.

Аналіз пошкодження інфраструктури. Аналіз пошкоджень інфраструктури житлового фонду під час війни передбачає детальне вивчення обсягів руйнувань ключових об'єктів – електропідстанцій, ліній електропередач, котелень, які забезпечують енергопостачання багатоповерхових будинків. Для цього використовуються дані про фактичні пошкодження, отримані як від місцевих органів влади, так і за допомогою супутникового моніторингу. Особливу увагу приділяють картографуванню зон із найбільшими втратами та пошкодженнями, що дозволяє оперативно визначати пріоритетні напрямки для відновлення інфраструктури, планувати розподіл ресурсів і організовувати допомогу населенню. Такий підхід дає змогу не лише фіксувати масштаби руйнувань, а й забезпечувати ефективне реагування на критичні ситуації, підвищуючи стійкість житлового фонду до подальших загроз.

Аналіз пошкоджень енергетичної інфраструктури може слугувати важливим джерелом інформації про стан довкілля. Руйнування електропідстанцій, ліній електропередач, котелень, складів пального чи промислових об'єктів часто супроводжується витоками небезпечних речовин, пожежами, забрудненням повітря, води та ґрунтів. Саме тому детальне картографування та документування пошкоджень дозволяє робити висновки про потенційні та фактичні екологічні наслідки [3]. Фіксація руйнувань на об'єктах енергетики чи промисловості, або ж прогнозування таких руйнацій, дозволяє визначити ймовірні точки викиду токсичних речовин (нафтопродуктів, важких металів, хімікатів). Аналізуючи площу об'єктів енергетичної інфраструктури та інтенсивність руйнувань, можна прогнозувати обсяги потенційного забруднення повітря (наприклад, під час пожеж), а також ризики потрапляння шкідливих речовин у воду, ґрунти, що знаходяться біля житлової забудови. Картографування таких зон дає змогу визначити території, які потребують пріоритетного екологічного моніторингу, прогнозування сценаріїв очищення або модернізації наявних технологій. Аналогічно з попереднім методом, можна провести аналіз зміни екологічних ситуацій після руйнацій та оцінити ефективність методів реагування. Це дозволяє прогнозувати розвиток подій на аналогічних об'єктах інфраструктури, що може включати тривале накопичення небезпечних відходів, деградацію ґрунтів, втрати біорізноманіття, екологічний слід від відновлення об'єктів та інше.

Інтегровані енергетично-екологічні аудити. Інтегровані екологічно-енергетичні аудити забезпечують комплексний підхід, який одночасно охоплює аналіз енергоспоживання будівель, оцінку вразливості інфраструктури та визначення екологічних ризиків, таких як забруднення повітря, води, ґрунтів і накопичення відходів. Проведення таких аудитів передбачає комплексну перевірку енерговикористання, дозволяє виявити слабкі місця у функціонуванні будівель і інженерних систем, а також розробити ефективні комплексні заходи для підвищення енергоефективності, зниження негативного впливу на довкілля та забезпечення стійкості інфраструктури до зовнішніх загроз. Під час аудиту здійснюється вимірювання тепловтрат через огороджувальні конструкції, аналізується стан інженерних систем (опалення, вентиляції, гарячого водопостачання), а також визначається клас енергоефективності будівлі відповідно до чинних національних стандартів. Це дозволяє виявити слабкі місця в енергоспоживанні, запропонувати шляхи оптимізації, диверсифікації ризиків та підвищити комфорт проживання мешканців [6].

Моделювання сценаріїв стійкості. Моделювання сценаріїв стійкості являє собою масштабніший аналіз та прогнозування і включає дані з попередніх вузьконаправлених методів аналізу [16]. Моделювання сценаріїв стійкості житлових будівель передбачає використання спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу споживання енергії в різних умовах, зокрема за наявності чи відсутності централізованого енергопостачання, а також при роботі резервних джерел, таких як генератори. Такий підхід дозволяє оцінити, наскільки житло здатне забезпечити комфорт і безпеку мешканців під час надзвичайних ситуацій. Додатково моделюється вплив впровадження альтернативних джерел енергії, зокрема сонячних панелей і теплових насосів, на загальну стійкість будівлі. Це дає змогу визначити оптимальні рішення для підвищення енергонезалежності та зниження екологічного впливу житлового фонду.

Оцінка соціальних наслідків. Оцінка соціальних наслідків втрати енергопостачання житлових будівель включає аналіз кількості домогосподарств, які залишилися без доступу до електроенергії, та тривалості таких періодів. Важливими аспектами є вивчення впливу на фізичне та психічне здоров’я мешканців: від порушення сну, підвищення рівня стресу і тривожності до загострення хронічних захворювань і зниження імунітету, що особливо критично для вразливих груп населення. Також оцінюються зміни в умовах проживання, наприклад, відсутність опалення, водопостачання чи можливості приготування їжі, що призводить до погіршення якості життя. В умовах тривалих перебоїв з енергопостачанням зростає рівень міграції населення, коли люди змушені залишати свої домівки в пошуках безпечніших і комфортніших умов. Основними індикаторами для оцінки соціальних наслідків є: кількість і частка домогосподарств, що зазнали відключень; середня тривалість періодів без енергопостачання; зміни у стані здоров’я населення; рівень звернень по соціальні та медичні послуги; частота вимушених переміщень; а також рівень задоволеності умовами проживання.

Використання ШІ. У сучасних умовах зростаючої військової нестабільності виникає об'єктивна потреба в нових підходах до аналізу ризиків і дедалі більш актуальним стає застосування штучного інтелекту (ШІ) для оцінювання воєнних загроз. Сьогодні він стає одним із ключових інструментів або слугує допоміжним для оцінки та мінімізації військових загроз щодо житлових будівель. Його можливості значно розширюють стандартні підходи до аналізу ризиків, підвищують точність прогнозів і можуть оперативно реагувати на надзвичайний контекст.

ШІ відіграє ключову роль у сучасній оцінці військових загроз для житлових будівель, забезпечуючи новий рівень точності, швидкості та комплексності аналізу. Завдяки здатності обробляти величезні масиви даних із різноманітних джерел – супутникових знімків, сенсорних мереж, камер відеоспостереження, даних із дронів, соціальних мереж і відкритих джерел розвідки – ШІ дозволяє виявляти потенційні загрози, такі як переміщення військової техніки, пошкодження інфраструктури чи зміни в навколишньому середовищі, які могли б залишитися непоміченими при ручному аналізі. Використовуючи алгоритми машинного навчання, ШІ моделює сценарії розвитку подій, оцінює ймовірність ураження будівель, масштаби можливих руйнувань і наслідки для мешканців. Це критично важливо для своєчасного планування евакуації та підготовки захисних заходів. Оперативність систем ШІ проявляється

у можливості працювати в реальному часі: автоматично виділяти ключову інформацію про нові загрози чи пошкодження, швидко передавати ці дані відповідним службам для організації рятувальних операцій, розподілу ресурсів та інформування населення [5].

ШІ не лише фіксує факт загрози, а й моделює можливі сценарії її розвитку – наприклад, прогнозує ситуацію у разі руйнування інфраструктури, відключення енергопостачання чи виникнення пожежі. Це дозволяє розробляти ефективні стратегії реагування та мінімізувати втрати. Інтелектуальні системи автоматизують процеси прийняття рішень: від розподілу рятувальних ресурсів до оптимізації маршрутів евакуації та доставки гуманітарної допомоги, що особливо важливо в умовах обмеженого часу та ресурсів [2].

У системі штучного інтелекту для виявлення загроз дані надходять з великої кількості джерел – це можуть бути супутникові знімки, результати радарних спостережень, сигнали зв'язку та відкриті джерела (OSINT) для військових ризиків; сенсорні мережі для контролю стану повітря, води, ґрунту і метеорологічні дані – для екологічних загроз; показники з датчиків, SCADA-систем і промислового моніторингу для енергетичних ризиків. Вся ця інформація передається до централізованого сховища або до хмарної платформи в реальному часі через захищені канали. Після цього дані проходять кілька етапів підготовки: фільтруються та очищаються від «шуму», нормалізуються формати, усувається дублювання й проводиться верифікація джерел, синхронізуються часові мітки та просторове позиціювання. У такому вигляді масив даних передається до аналітичних модулів.

Системи машинного навчання аналізують цей масив, розпізнають патерни або аномалії, коригують моделі, моделюють ймовірні сценарії розвитку подій та оперативно зіштовхують дані різних підсистем для комплексної оцінки (наприклад, зв'язування військових атак з енергетичними збоями та екологічними наслідками). Висновки, прогнози та тривоги надсилаються далі до модулів прийняття рішень.

В цьому модулі формуються рекомендації для операторів, кризових центрів, командування чи муніципальних служб; автоматично або напівавтоматично надсилаються відповідні сигнали для запуску резервних систем, евакуації, інформування громадськості, залучення сил безпеки. Інформація подається у вигляді інтуїтивних дашбордів, сповіщень, сценаріїв дій для фахівців. Система одержує зворотний зв'язок – тобто результати реагування людей та техніки – і на основі цього самонавчається й адаптує свої моделі. Всі потоки даних концентруються у дата-центрі або хмарній екосистемі, а взаємодія між підсистемами забезпечується через API з наскрізним логуванням і аутентифікацією (рис. 2).

Таким чином, більшість з описаних методологій виявлення енергетичного чи екологічного впливу від військових загроз ШІ може активно використовувати у своїй роботі по реагуванню на надзвичайні ситуації. Завдяки подібним прогнозам і моделюванню ризиків підвищується готовність до надзвичайних ситуацій, дозволяючи урядам, службам цивільного захисту та мешканцям краще підготуватися до можливих атак, що зменшує кількість жертв і матеріальних збитків [15]. На практиці це проявляється у використанні ШІ для аналізу супутникових знімків та ідентифікації зруйнованих житлових будівель після обстрілів, у впровадженні автоматизованих систем

моніторингу, які виявляють пошкодження інженерних мереж і прогнозують їхній вплив на життєзабезпечення населення, а також у моделюванні сценаріїв евакуації з урахуванням реального стану доріг, наявності укриттів і розташування небезпечних зон.

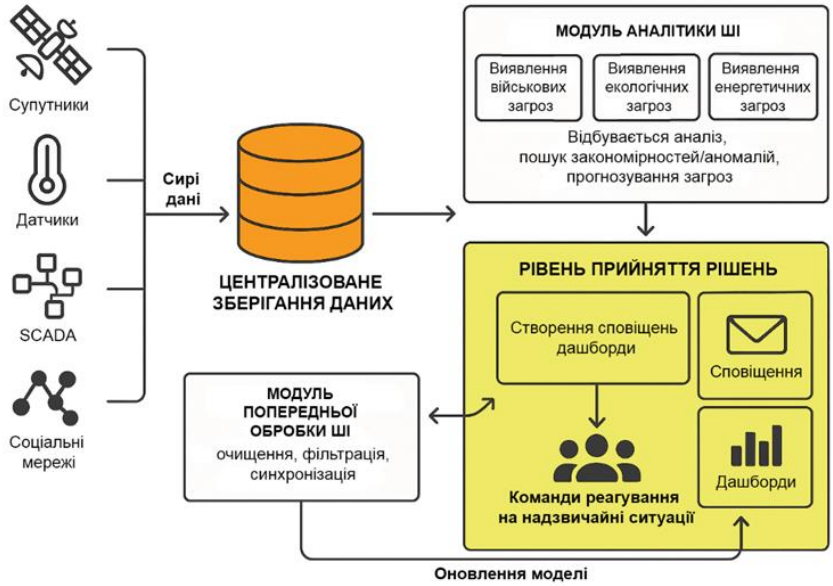


Рис. 2. Структура роботи із системою штучного інтелекту в області реагування на надзвичайні ситуації

Завдяки здатності аналізувати масиви непрямих даних, таких як звіти, повідомлення у соціальних мережах, фото та відео, ШІ може виявляти приховані джерела забруднення або зміщення екосистем, які важко виявити традиційними методами спостереження. Такі цифрові інструменти забезпечують швидкість і масштабність моніторингу, дозволяють оперативно отримувати достовірні оцінки стану довкілля та виявляти навіть неочевидні екологічні ризики. Завдяки таким можливостям, використання штучного інтелекту під час війни сприяє не лише ефективнішому екологічному моніторингу, а й прийняттю більш зважених рішень для захисту навколишнього середовища, прогнозуванню довгострокових наслідків та мінімізації загроз для здоров'я населення.

Дискусія

Сучасна практика та досвід військових конфліктів свідчать про необхідність застосовування інтегрованих підходів, які одночасно дозволяють оцінювати вплив військових загроз на енергетичну та екологічну стійкість. Це означає, що при аналізі вразливостей енергетичних систем потрібно враховувати потенційний вплив аварій, перебоїв чи аварійного використання альтернативних джерел енергії на довкілля. Наприклад, оцінка енергетичної безпеки має включати аналіз ризику забруднення від генераторів, витоків пального, аварійних викидів, а також визначати, наскільки впроваджені рішення відповідають принципам сталого розвитку.

Сучасні системи моніторингу та управління IEA, Smart Grid і IoT забезпечують автоматизований контроль як енергетичних потоків, так і ключових екологічних параметрів у житлових будівлях та інфраструктурі. Завдяки інтеграції інтелектуальних алгоритмів ці системи не лише фіксують потенційні загрози, а й автоматично реагують на них: вмикають резервні джерела енергії, запускають системи очищення повітря та води, а також оперативно попереджають мешканців про небезпеку [7]. Це підвищує рівень захищеності та стійкості житлового фонду до зовнішніх викликів і надзвичайних ситуацій.

Прикладом впровадження системи розумного енергомоніторингу є використання програмованого логічного контролера Brainboxes BB-400 для відслідковування споживання енергії на окремих ділянках підприємства і пристроях виробництва автомобільного освітлення у 2024 році. Зібрані дані автоматично агрегуються в центральній системі й аналізуються разом із показниками викидів CO_2. Це дає можливість виявити ділянки з найбільшими втратами енергії та викидами, оцінити, як зміни в графіках споживання впливають на обсяг викидів і екологічний слід підприємства. Результатом стало зниження енергоспоживання, скорочення викидів CO_2 та підвищення прозорості екологічної звітності [4].

При дослідженні двох багатоквартирних житлових будинків міста Торонто (Канада) було проведено енергетичний аудит, який включав оцінку споживання енергії, викидів парникових газів та інших екологічних показників [17]. На основі аудиту запропоновано енергоефективні заходи, що дозволили зменшити енергоспоживання та скоротити викиди CO_2. Аналіз екологічного впливу проводився за допомогою методології оцінки життєвого циклу (LCA), що дало змогу кількісно оцінити зменшення негативного впливу на довкілля після впровадження енергозберігаючих рішень [10].

Енергетичний аудит адміністративної будівлі університету у місті Таркова (Гана) показав, що впровадження оптимізованих систем освітлення та кондиціонування дозволило знизити загальне споживання енергії на 24%, а також зменшити викиди CO_2 на більш ніж 62 тонни на рік. Це стало можливим завдяки детальному аналізу енергетичних і екологічних показників під час аудиту [7].

У Чилі дослідження соціального житла включало оцінку енергетичних витрат, екологічного впливу протягом життєвого циклу будівлі та соціальних наслідків для мешканців. Виявлено, що впровадження енергоефективних рішень (утеплення, сучасні системи опалення) не лише знижує енергоспоживання та викиди, а й покращує умови проживання, зменшує витрати на енергію та підвищує задоволеність мешканців житлом [14].

Моделювання різних сценаріїв енергоспоживання з урахуванням використання відновлюваних джерел енергії, пасивної ізоляції та рекуперації тепла було застосовано у модернізованому житловому комплексі BedZED (Велика Британія). Аналіз показав, що завдяки впровадженню цих рішень вдалося знизити споживання енергії та викиди CO_2 на 70% у порівнянні з традиційними житловими комплексами. BedZED став еталоном для подальших екологічних проєктів і довів ефективність сценарного моделювання для оцінки екологічного впливу житла [9].

В Україні у 2022–2023 роках вже проводились практики одночасного аналізу енергетичних пошкоджень та екологічного впливу. Після масованих атак в певних районах супутникові дані та звіти місцевої влади

використовували для картографування зон із найбільшими руйнуваннями електростанцій, підстанцій, нафтобаз, промислових об'єктів [8]. На основі цієї інформації екологічні служби проводили відбір проб повітря, води та ґрунтів, де були зафіксовані витоки пального, токсичних речовин чи пожежі. Аналіз результатів дозволив виявити підвищені концентрації шкідливих речовин, оцінити масштаб екологічної шкоди та спрогнозувати ризики для здоров'я населення та довкілля. Це дозволяє виділяти території пріоритетного екологічного моніторингу та очищення, що потребують планів швидкого реагування чи модернізації [11].

В умовах війни такі рішення стають основою для збереження життєдіяльності міст і сіл, захисту здоров'я людей і мінімізації довгострокових втрат для економіки та довкілля. Оперативний моніторинг і гнучке реагування дозволяють не лише зменшити наслідки руйнувань, а й підвищити стійкість житлового фонду до майбутніх викликів, забезпечуючи базову безпеку та екологічну збалансованість навіть у найскладніших обставинах.

Висновки

Інтеграція екологічної складової в стратегічне планування енергетичної безпеки є необхідною вимогою в умовах війни, коли ризики для довкілля та інфраструктури зростають одночасно з загрозами для життя і здоров'я людей.

Сучасні підходи до енергоефективності повинні враховувати не лише технічні, а й екологічні аспекти, зокрема вплив аварійних джерел енергії, забруднення та накопичення небезпечних відходів, що дозволяє зменшити довгострокові втрати для здоров'я населення та природного середовища.

Ефективне реагування на енергетичні загрози можливе лише за умови застосування комплексного підходу, що включає екологічний моніторинг, аналіз пошкоджень, моделювання сценаріїв стійкості та соціальні аудити для підвищення адаптивності житлових будівель до нових викликів.

Цифрові інструменти та методи штучного інтелекту відіграють ключову роль у швидкому виявленні та прогнозуванні ризиків, забезпечуючи оперативну кризову реакцію та підтримку прийняття рішень на основі великих масивів даних.

Запровадження екологічно-енергетичних аудитів, сучасних моделей управління та інтелектуальних систем є необхідною умовою для захисту базових умов життя населення та формування основ зеленої перебудови України за принципом «відбудуємо краще».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Моніторингова місія ООН з прав людини в Україні. (2024, September). *Атаки на енергетичну інфраструктуру України: Шкода цивільному населенню*. https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-12/UKR_Attacks_on_Ukraine%E2%80%99s_Energy_Infrastructure_Harm_to_the_Civilian.pdf
2. *Використання штучного інтелекту для передбачення та пом'якшення впливу кліматичних змін на екосистеми*. (n.d.). Neuron. https://neuron.expert/news/ai-and-climate-change-predicting-environmental-shifts/13836/uk/
3. Київська школа економіки. (2024, April). *Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України. Станом на початок 2024 року*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf

4. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. (2018). *Методика визначення енергетичної ефективності будівель* (Наказ № 169 від 11.07.2018). https://zakon.rada.gov.ua/go/z0822-18
5. *Роль штучного інтелекту в прогнозуванні та управлінні катастрофами: нові можливості та перспективи*. (n.d.). Mediacom. https://mediacom.com.ua/rol-shtuchnogo-intelektu-v-prognozuvanni-ta-upravlinni-katastrofami-novi-mozhlivosti-ta-perspektivi/
6. Шовкалюк, М. М., Рабенко, Є. О., & Яценко, О. І. (2025). Моделювання показників енергоспоживання багатоквартирної будівлі з використанням спеціалізованих програмних продуктів. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (1), 15–24.
7. *Achieving sustainable consumption of electricity through energy audit: A case study of a public sector institution in Ghana*. (2013). *International Journal of Development and Sustainability*, 2(2), 78–89.
8. Albakjaji, M. (2022). The responsibility for environmental damages during armed conflicts: The case of the war between Russia and Ukraine. *Access to Justice in Eastern Europe*, 4(2), 82–101. https://doi.org/10.33327/AJEE-18-5.4-a000444
9. BioRegional Development Group. (2009). *BedZED seven years on*. https://globalwellnessinstitute.org/wp-content/uploads/2019/12/BedZEDsevenyearson_lowres.pdf
10. Chandrasekaran, V., Dvarioniene, J., Vitkute, A., & Gecevicius, G. (2021). Environmental impact assessment of renovated multi-apartment building using LCA approach: Case study from Lithuania. *Sustainability*, 13(3), Article 1542. https://doi.org/10.3390/su13031542
11. Goriunov, D., & Piddubnyi, I. (2024, May). *Assessment of damages and losses to Ukraine's energy sector due to Russia's full-scale invasion*. Kyiv School of Economics. https://dtek.com/content/upload/urc/Kyiv%20School%20of%20Economics_2024.pdf
12. Joint Research Centre. (2025, April 11). *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en
13. Kostyuchenko, N., & Smolennikov, D. (2025). Die Energiepolitik der Ukraine: Vom braunen Energielobbyismus zum grünen Nachkriegskonjunkturprogramm. In *Das politische System der Ukraine* (pp. 267–284). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-47476-8_13
14. Navarro, I. J., O'Ryan, R., Cortés, G., & Urquiza, A. (2023). Social impacts of energy efficiency improvements in social housing: Insights from a life cycle assessment in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 397, Article 136535.
15. Rao, G. P., Krishna, P. V. R., Adithya, K. S., & Avinash, B. S. (2025). Protection and monitoring of smart grids with IoT. *E3S Web of Conferences*, 616, Article 03023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561603023
16. *Smart energy monitoring: A case study from Brainboxes*. (n.d.). KnowHow Distrelec. https://knowhow.distrelec.com/energy-and-power/smart-energy-monitoring-a-case-study-from-brainboxes/
17. Taileb, A., & Sherzad, M. F. (2023). Energy audits and energy modeling as a tool towards reducing energy consumption in buildings: The cases of two multi-unit residential buildings (MURBs) in Toronto. *Sustainability*, 15(18), Article 13983. https://doi.org/10.3390/su151813983
18. Uhodnikova, O., Oleksenko, R., Cirella, G. T., Marchenko, O., & Azhazha, M. (2024). Ukraine's potential for sustainable development: Exploring global implications amidst conflict and reconstruction. In *Handbook on Post-War Reconstruction and Development Economics of Ukraine* (pp. 231–248). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48735-4_12
19. Yutilova, K., & Adamski, A. (2025). War-induced threats to environmental resilience in Ukraine and recovery perspectives. *Prace Geograficzne*, 178, 137–152. https://doi.org/10.4467/20833113PG.25.007.21636

Стаття надійшла до редакції 24.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 15.09.2025

REFERENCES

1. UN Human Rights Monitoring Mission in Ukraine. (2024, September). *Attacks on Ukraine's energy infrastructure: Harm to civilians*. https://ukraine.ohchr.org/sites/default/files/2024-12/UKR_Attacks_on_Ukraine%E2%80%99s_Energy_Infrastructure_Harm_to_the_Civilian.pdf (in Ukrainian).
2. *Using artificial intelligence to predict and mitigate the impact of climate change on ecosystems*. (2024, August 26). *Neuron*. https://neuron.expert/news/ai-and-climate-change-predicting-environmental-shifts/13836/uk (in Ukrainian)
3. Kyiv School of Economics. (2024). *Report on direct infrastructure damage from destruction as a result of Russia's military aggression against Ukraine: As of early 2024*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2024/04/01.01.24_Damages_Report.pdf (in Ukrainian).
4. Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine. (2018). *Methodology for determining the energy efficiency of buildings* (Order No. 169 of July 11, 2018). https://zakon.rada.gov.ua/go/z0822-18 (in Ukrainian).
5. *The role of artificial intelligence in disaster forecasting and management: New opportunities and prospects*. (2024, August 26). *Mediacom*. https://mediacom.com.ua/rol-shtuchnogo-intelektu-v-prognozuvanni-ta-upravlinni-katastrofami-novi-mozhlivosti-ta-perspektivi/ (in Ukrainian).
6. Shovkalyuk, M. M., Rabenko, E. O., & Yatsenko, O. I. (2025). Modeling of energy consumption indicators of an apartment building using specialized software products. *Energy: Economics, Technologies, Ecology*, (1), 15–24.
7. *Achieving sustainable consumption of electricity through energy audit: A case study of a public sector institution in Ghana*. (2013). *International Journal of Development and Sustainability*, 2(2), 78–89.
8. Albakjaji, M. (2022). The responsibility for environmental damages during armed conflicts: The case of the war between Russia and Ukraine. *Access to Justice in Eastern Europe*, 4(2), 82–101. https://doi.org/10.33327/AJEE-18-5.4-a000444
9. BioRegional Development Group. (2009). *BedZED seven years on*. https://globalwellnessinstitute.org/wp-content/uploads/2019/12/BedZEDsevenyearson_lowres.pdf (in Ukrainian).
10. Chandrasekaran, V., Dvarioniene, J., Vitkute, A., & Gecevicius, G. (2021). Environmental impact assessment of renovated multi-apartment building using LCA approach: Case study from Lithuania. *Sustainability*, 13(3), Article 1542. https://doi.org/10.3390/su13031542
11. Goriunov, D., & Piddubnyi, I. (2024, May). *Assessment of damages and losses to Ukraine's energy sector due to Russia's full-scale invasion*. Kyiv School of Economics. https://dtek.com/content/upload/urc/Kyiv%20School%20of%20Economics_2024.pdf (in Ukrainian).
12. Joint Research Centre. (2025, April 11). *War worsens climate and environmental challenges in Ukraine*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/war-worsens-climate-and-environmental-challenges-ukraine-2025-04-11_en
13. Kostyuchenko, N., & Smolennikov, D. (2025). Die Energiepolitik der Ukraine: Vom braunen Energielobbyismus zum grünen Nachkriegskonjunkturprogramm. In *Das politische System der Ukraine* (pp. 267–284). Springer VS. https://doi.org/10.1007/978-3-658-47476-8_13
14. Navarro, I. J., O'Ryan, R., Cortés, G., & Urquiza, A. (2023). Social impacts of energy efficiency improvements in social housing: Insights from a life cycle assessment in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 397, Article 136535.
15. Rao, G. P., Krishna, P. V. R., Adithya, K. S., & Avinash, B. S. (2025). Protection and monitoring of smart grids with IoT. *E3S Web of Conferences*, 616, Article 03023. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202561603023

16. *Smart energy monitoring: A case study from Brainboxes*. (2024, August 26). *KnowHow Distrelec*. https://knowhow.distrelec.com/energy-and-power/smart-energy-monitoring-a-case-study-from-brainboxes/ (in Ukrainian).
17. Taileb, A., & Sherzad, M. F. (2023). Energy audits and energy modeling as a tool towards reducing energy consumption in buildings: The cases of two multi-unit residential buildings (MURBs) in Toronto. *Sustainability*, 15(18), Article 13983. https://doi.org/10.3390/su151813983
18. Uhodnikova, O., Oleksenko, R., Cirella, G. T., Marchenko, O., & Azhazha, M. (2024). Ukraine's potential for sustainable development: Exploring global implications amidst conflict and reconstruction. In *Handbook on Post-War Reconstruction and Development Economics of Ukraine* (pp. 231–248). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-48735-4_12
19. Yutilova, K., & Adamski, A. (2025). War-induced threats to environmental resilience in Ukraine and recovery perspectives. *Prace Geograficzne*, 178, 137–152. https://doi.org/10.4467/20833113PG.25.007.21636

The article was received 24.06.2025 and was accepted after revision 15.09.2025

Гамоцький Роман Олегович
аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури
Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітряних сил, 31
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5469-8606 ***e-mail:*** roman.hamotskyi@gmail.com

UDC 577.4.546

Serhii Poroshenko, postgraduate
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-8258-8033 ***e-mail:*** s.poroshenko@kpi.ua

Oleksandr Khokhotva, D. Sc. in Engineering, Associate Professor
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2607-9242 ***e-mail:*** khokhotva@bigmir.net

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

ADVANCED RESOURCE-EFFICIENT TECHNOLOGIES FOR CHROMIUM (VI) REMOVAL FROM INDUSTRIAL WASTEWATER: ANALYSIS AND REUSE POTENTIAL

Abstract. *The study addresses a scientific and practical challenge — investigating modern methods for the treatment of wastewater contaminated with hexavalent chromium (Cr(VI)), with a focus on the development of environmentally safe and resource-efficient technologies. The paper analyses key treatment approaches for galvanic wastewater, including chemical precipitation, electrocoagulation and galvanocoagulation, ion exchange, membrane filtration, sorption, and biological methods. The advantages, limitations, efficiency, and economic viability of each method are assessed. Special attention is given to technologies that remove Cr(VI) from wastewater and enable the recovery or reuse of extracted components in industrial processes. The prospects of applying natural and synthetic sorbents, ion-exchange processes for obtaining valuable products, and electrochemical and biological approaches as alternatives to conventional chemical methods are considered. The development of closed-loop technologies is substantiated as a promising direction to minimise the environmental impact of industrial effluents.*
Keywords: *wastewater, chromium (VI), water treatment, resource conservation, reuse, sorption methods, ion exchange, electrochemical treatment, biological treatment, waste utilisation, environmentally friendly technologies.*
https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.57-68

Introduction

In Ukraine, industry stands as the primary consumer of water resources, and the expansion of its capacities is accompanied by an increase in both water consumption and wastewater volumes. This intensifies the ecological burden on the environment, particularly due to toxic components present in effluents. Amid escalating environmental challenges, the implementation of effective industrial wastewater treatment technologies, especially in the context of developing resource-saving solutions, gains particular urgency. One of the priorities of modern environmental policy is to prevent the discharge of hazardous substances, including chromium (VI) components, which pose a threat to aquatic ecosystems and human health.

Chromium-containing components are the main harmful substances found in the wastewater of electroplating plants and industrial enterprises. These components exert an extremely negative impact on living organisms due to their cumulative and toxic properties, and they complicate the operation of natural and municipal wastewater treatment plants. Currently, most machine-building enterprises with electroplating production facilities face the problem of utilising electroplating waste

© S. Poroshenko, O. Khokhotva, 2025

sludge, particularly heavy metal ions, which are classified as hazardous waste of hazard classes 2-4 and significantly affect the state of the environment and human health (Genawi et al., 2020).

The presence of heavy metals in wastewater exerts a toxic effect on biological systems and the environment as a whole. A significant global challenge is the presence of chromium(VI) in industrial wastewater, as this substance is highly detrimental to animals due to its ability to generate reactive oxygen species in cells. Excessive chromium exposure affects the lungs and leads to respiratory disorders in humans (Bashir, 2021). Chromium-containing components hinder the vital activity of microorganisms and complicate the biochemical treatment process of wastewater. Therefore, the greatest danger lies in the high toxicity of these substances.

Numerous treatment processes for the removal of hexavalent chromium have been investigated and thoroughly reviewed. These include the use of natural absorbents; traditional chemical reduction methods; bioabsorption; the application of nanotechnology, and other techniques (Bashir, 2021; Shekhawat et al., 2015; Ying et al., 2020; Barakat, 2010; Gitet et al., 2013). Currently, experts estimate that thousands of tons of highly toxic heavy metals, such as zinc (3.3 thousand tons), nickel (2.4 thousand tons), and chromium (0.5 thousand tons), among others, enter water bodies annually with inadequately treated industrial wastewater, significantly complicating the ecological situation.

In light of these challenges, particular attention must be paid to the quality of wastewater treatment from highly toxic substances. Therefore, the aim of this work is to study the methodology and methods for treating wastewater to remove chromium(VI).

Analysis of Recent Research and Publications

Sorption technology stands out as one of the most promising methods for wastewater treatment, widely adopted in industrially developed countries. The effectiveness of the sorption method lies in its ability to remove heavy metals from large volumes of wastewater, regardless of pH levels, while simultaneously neutralising them. However, the complexity of sorptive removal of chromium(VI) compounds stems from their presence in aqueous solutions as anionic forms, which are poorly sorbed by conventional cation exchangers like clay minerals and zeolites. Specifically, the predominant forms of Cr(VI) in an aqueous environment are $HCrO_4^-$ and CrO_4^{2-}. $HCrO_4^-$ dominates at pH < 4, while chromate ions prevail at pH > 9 (Pylypenko & Spasonova, 2020; Homelia et al., 2012).

Another notable characteristic of hexavalent chromium compounds is their redox sensitivity. CrO_4^{2-} ions are easily reduced to their tri- or tetravalent states, even under relatively mild conditions. At low or neutral pH values, anionic forms of Cr(VI) act as powerful oxidizers (Barakat, 2010). Industrial pollution is the most common way for chromium (VI) to enter the environment, typically as a result of spills, improper storage, or disposal. It readily dissolves in water and is known to penetrate water sources, leach into groundwater, and enter the human body (Gitet et al., 2013). A well-documented case involved PG&E discharging approximately 370 million gallons of chromium-contaminated wastewater into water bodies near Hinkley, California, leading to significant groundwater contamination (Kennedy, 2003). This case vividly illustrates the need for not only effective removal of

chromium (VI) from wastewater but also the implementation of technologies that enable its reuse in the production cycle. This approach helps reduce the volume of toxic sludge, lowers waste disposal costs, and preserves chromium as a valuable resource. In the context of rising raw material costs and a global shift toward a circular economy, the regeneration and return of chromium to the technological process is not only environmentally sound but also economically beneficial.

Despite the variety of modern approaches to heavy metal wastewater treatment – including reagent, ion exchange, electrochemical, and membrane methods – most remain highly specialized, limited in terms of economic efficiency, or lack environmental universality. The presence of chromium(VI) in electroplating effluents not only poses a distinct toxic threat but can also complicate the removal processes of other pollutants. A review of scientific works (Pylypenko & Spasonova, 2020; Homelia et al., 2012; Vukĉević et al., 2014; Liniucheva et al., 2017; Jung et al., 2013; Gorshkova et al., 2015; Suvorin et al., 2019) allows for a systematic classification of current treatment methods for such effluents and an evaluation of their effectiveness in complex matrices containing Cr(VI).

This study aims to analyze methods and methodologies for wastewater treatment to remove chromium(VI), with a particular emphasis on technologies that allow for the processing and reuse of extracted substances in production processes, contributing to the creation of environmentally friendly and resource-efficient technologies.

Elucidating the Core Research Material

Chromium(VI) is an elemental compound formed during industrial processes. This heavy metal is classified as a human carcinogen. Its penetration into the body can occur through inhalation, ingestion, and skin contact (Ying et al., 2015). Chromium most commonly exists in its trivalent (Cr(III)) and hexavalent (Cr(VI)) states. Notably, Chromium(VI) is known to be toxic to animals, capable of causing dermatitis, lung cancer, kidney and stomach damage, and respiratory and eye irritation (Shekhawat et al., 2012).

Chromium possesses multiple oxidation states, each with a unique set of properties. For instance, the trivalent state of chromium, Cr(III), is essential for carbohydrate metabolism in humans (Kennedy, 2003). Conversely, hexavalent chromium, Cr(VI), is considered toxic. Cr(VI) is one hundred times more toxic than Cr(III) and is also more soluble in water. It acts as a strong oxidizer, capable of releasing free radicals that exert carcinogenic effects on cells. Cr(VI) typically forms compounds with other elements, such as iron(II) chromite ($FeCr_2O_4$) (Pylypenko & Spasonova, 2020).

Currently, various methods have been developed and are employed for the removal of Chromium(VI) from wastewater. These methods include reduction of chromium(VI) to chromium(III), electro- and galvanocoagulation, ion exchange, membrane, sorption, and biological methods (Bashir, 2021; Shekhawat et al., 2015; Ying et al., 2020; Barakat, 2010; Gitet et al., 2013). However, almost all of these approaches involve the use of various chemical reagents. Following their application, the salt content of the treated water increases, often rendering it unsuitable for discharge into the environment and necessitating additional purification steps (Pylypenko & Spasonova, 2020; Vukĉević et al., 2014).

The traditional method for treating wastewater contaminated with hexavalent chromium relies on its reduction to trivalent chromium, followed by precipitation as hydroxide in an alkaline environment. Common reducing agents include sulfur dioxide, sodium sulfite, sodium bisulfite, and hydrazine. Additionally, activated carbon, ferrous sulfate, hydrogen, sulfur dioxide, and organic waste materials can also serve as reductants (Homelia et al., 2012). Reagent-based treatment of effluents is carried out in both continuous and batch-mode installations. The upper limit for batch-mode applications is typically defined by a capacity of up to 20 m^3/hour.

In practice, sodium sulfite (Na_2SO) solutions are effectively used in an acidic environment for the reduction of chromium (VI) to chromium (III). According to research (Beukes et al., 1999), the optimal pH range for this reaction is 2-5, with the reduction rate significantly decreasing as the pH increases to 6 and above. Sulfite reacts with Cr(VI) according to the following equations:

$$2HCrO_4^- + 4HSO_3^- + 6H^+ \rightarrow 2Cr^{3+} + 2SO_4^{2-} + S_2O_6^{2-} + 6H_2O;$$
$$2HCrO_4^- + 3HSO_3^- + 5H^+ \rightarrow 2Cr^{3+} + 3SO_4^{2-} + 5H_2O.$$

Research indicates that to achieve a 95% reduction in Cr(VI) concentration, the concentration of sulfite must be five times greater than the initial Cr(VI) concentration. However, an excess of S(IV) can lead to the formation of $S_2O_6^{2-}$, which may necessitate additional treatment stages for secondary products. Experiments utilizing ferromolybdenum production dust demonstrated that sodium sulfite is effective for Cr(VI) concentrations up to 26 mg/L, provided the solution's pH is strictly controlled (Beukes et al., 1999).

Coagulation is the process where dispersed particles agglomerate due to their interaction and combine into larger aggregates. Coagulation can occur spontaneously under the influence of chemical and physical processes. However, in wastewater treatment, coagulation is typically induced by adding specialized substances called coagulants (Barakat, 2010). Coagulants, when introduced into water, form rapidly settling flocs of metal oxide hydrates under the force of gravity.

For the treatment of chromium-containing wastewater, aluminium and iron salts are commonly used as coagulants. The most widely used coagulant is aluminium sulfate, $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, which is effective within a pH range of 5 - 7.5. Studies have shown that using mixtures of $Al_2(SO_4)_3$ and $FeCl_3$ in ratios of 1:1 or 1:2 significantly increases the settling rate of flocs and reduces Cr(VI) concentrations to acceptable levels (Bashir, 2021).

Sodium aluminate ($NaAlO_2$) and aluminium oxychloride ($Al_3(OH)_5Cl$) are employed for treating weakly alkaline waters due to their lower acidity and ability to accelerate the coagulation process. Their combined use allows for increased sludge density and expands the effective pH range (Homelia et al., 2012).

Iron salts, particularly $Fe_2(SO_4)_3$ and $FeCl_2$, demonstrate high coagulation efficiency at low water temperatures and across a broad pH range (6 - 9 for Fe^{3+} and 9.5 and above for Fe^{2+}) (Bashir,2021). Ferric chloride is typically used at 10-15% and $Al_2(SO_4)_3$ not only facilitates Cr(VI) removal but also enables the recovery of Cr(III) for subsequent industrial reuse (Homelia et al., 2012).

Furthermore, natural flocculants (e.g., starch, cellulose) and synthetic polymers are utilized to neutralize chromium. These substances accelerate particle aggregation and promote the formation of dense flocs (Lazarieva et al., 2019; Bashir, 2021).

The high toxicity of sulfide-alkaline solutions and the impossibility of their direct discharge into water bodies and soils necessitate the research and development of alternative and more effective technologies for their processing and neutralization.

One method that prevents chromate ions from entering municipal sewers is ion exchange (Homelia et al., 2004). However, the implementation of ion exchange technology leads to the accumulation of regeneration solutions, the disposal of which results in the formation of toxic sludges and the loss of valuable components. In this context, the selective removal of Cr(VI) is crucial, as it avoids its reduction to Cr(III) and subsequent change in oxidation state. Nevertheless, when using membrane methods, Cr(VI), being a strong oxidizer, can cause damage to polymeric membranes, limiting their application. Thus, the issue of effective disposal of regeneration solutions remains relevant, as Cr(VI) can be present in concentrated form as chromate or dichromate, requiring further processing and disposal methods.

During the desorption of chromium (VI) from anion exchangers, regeneration solutions are formed, the composition of which depends on the chosen type of regeneration. For example, when alkalis are used, solutions containing chromium (VI) in concentrations of about 10 g/dm^3 are produced, with an excess of NaOH potentially reaching about 10 g/dm^3. Solutions formed using formic acid in the reductive regeneration process should be evaporated in a rotary evaporator. This process distils off water with excess formic acid, and this solution is then reused for ionite regeneration. The residue is chromium formate, which is a valuable substance (Table 1). From chromium formate, metallic chromium can be obtained in a reducing environment. This product is used in the production of metal powders and in applying metallic coatings to surfaces (Homelia et al., 2004).

The reviewed method for processing and utilizing chromium-containing regeneration solutions enables the creation of environmentally friendly technologies and the isolation of chromates as valuable products (Homelia et al., 2004).

When dealing with high concentrations of heavy metals in wastewater, electrochemical treatment methods are often employed. These methods are advantageous as they typically do not require additional reagents and can be fully automated. In most cases, electrochemical methods are environmentally clean, eliminating the "secondary" contamination of water with anionic and cationic residues that are characteristic of reagent-based approaches.

Table 1. Obtaining Chromium Formates During Reductive Regeneration (Homelia et al., 2004)

Composition of Regeneration Solution	Reagent Dose, g	Mass of Sorbed Chromium (VI), g	Mass of $Cr(HC(O)O^-)_3$, g	Yield $Cr(HC(O)O^-)_3$, g
$C_3H_8O_3$, HC(O)OH	1:20	2,01	6,5	96,3
$C_3H_8O_3$, HC(O)OH	1:10	1,94	6,6	97,1
$C_3H_8O_3$, HC(O)OH	1:1	2,01	6,7	96,7

A patented electrochemical wastewater treatment technology exists for removing chromium-containing compounds. During this purification process, all chromates convert into insoluble $Cr(OH)_3$ compounds. However, a drawback of this method is the need for complex equipment, specifically an electrolyzer with lead electrodes, and increased energy consumption.

A combined electrocoagulation-electroflotation process has been developed to reduce Cr(VI) concentrations to below 0.5 mg/L without the need for filtration (Gao et al., 2005). This process involves the preliminary reduction of Cr^{6+} to Cr^{3+}, followed by the coagulation and flotation of $Cr(OH)_3$ and $Fe(OH)_3$ sludge using air bubbles. This method can decrease energy consumption to 1 kWh/m³ of water at an electrical load of 2.5 F/m³ of water. Nevertheless, a challenge with this technology is the removal of fine flocs, which may require additional purification steps.

Electrochemical methods for neutralizing or regenerating chromium-containing effluents are categorized into several types: electrolysis without a diaphragm, membrane electrolysis with one or more membranes, electrocoagulation and galvanocoagulation, electroflocculation, and electroflotation (Pylypenko & Spasonova, 2020).

It's worth noting that electrodeposition of metals from wastewater addresses several critical objectives, particularly technical-economic (by returning metals to production) and environmental ones, which draws significant attention. However, the use of electrochemical methods faces several limitations. The efficiency of wastewater purification during electrochemical treatment is influenced by various physicochemical, electrical, and hydrodynamic factors, including the wastewater's salt composition, temperature, the composition of added electrolyte, the flow rate of water in the inter-electrode space, and current density (Liniucheva et al., 2017).

While electrochemical methods offer potential for wastewater treatment, they require precise adherence to influent parameters, which is often challenging to achieve under real industrial conditions. Additionally, the presence of extraneous ions in the wastewater can interfere with the reduction process.

Sorption methods are highly effective and prevent the formation of mixed sludges from spent solutions. Among these, the use of powdered activated carbon (PAC) is particularly notable. It not only reduces Cr(VI) concentrations by reducing it to Cr(III) but also allows for subsequent adsorption of Cr(III) onto the PAC itself. A study (Shinde et al., 2018) found that this method can achieve purification levels below 2 ppm without generating sludge, making it a promising option for industrial-scale application. Key parameters for selecting a material for this method include its sorption qualities, porosity, and cost-effectiveness. Carbon sorbents (Vukĉević et al., 2014), iron compounds (Jung et al., 2013), and various natural biomaterials are used as sorbents for treating spent chromium-containing solutions. The advantages of the sorption method include:

- purification to the maximum permissible concentration (MPC) requirements;
- the possibility of recovering sorbed substances;
- the potential to return treated water to production after pH adjustment (Pylypenko & Spasonova, 2020).

The main factors influencing the effectiveness of sorption (the sorption capacity of the anion exchanger) are pH, contact time, and chromium concentration. Benefits of this method include its extremely low sensitivity to the initial contaminant content, the ability to discharge treated wastewater to municipal aeration stations, and the option to discharge treated wastewater into water bodies for cultural and domestic use (with additional purification using electrodialysis or ion-exchange filters).

Research (Homelia et al., 2002) has demonstrated that the sorption capacity of the anion exchanger AV-17-8 is maximized in the pH range of 2-6 when using chromic acid solutions. At pH 7-13, the ion exchanger's capacity decreases by a factor of 2 or more. The distribution coefficient reaches its peak value at pH 2 and a chromium concentration of 10 g/L. At low chromium concentrations (up to 1 g/L) in potassium dichromate solutions, the distribution coefficient in an alkaline environment differs little from its values in a neutral environment. This particular ion exchanger can effectively remove chromate anions from environments with pH up to 12, at chromate concentrations up to 1 g/L.

In establishing the physicochemical characteristics of purifying natural waters from chromium(VI) contamination using composite sorbents based on clay minerals modified with nanoscale iron, the influence of key factors on the sorption process was investigated. These factors included the dispersity of sorbent particles, the ratio of main components within the composite sorbent, and the pH of the aqueous medium. The effectiveness of chromium removal by modified silicate materials was compared with the sorption capacity of synthesized nanoscale Fe^0 dispersions. To determine the optimal conditions for chromium sorption by iron-containing materials, the impact of sorbent-solution contact time was studied ($I = 0.01$, $C_{Cr(VI)} = 1000$ μmol/dm^3).

The obtained data indicate that the maximum sorption capacity for chromium by the studied Fe^0 samples consistently increases with increasing dispersity. To enhance the dispersity of nanoscale Fe^0, it was synthesized in the presence of montmorillonite, and the physicochemical characteristics of its sorption capacity towards metal anions were investigated (Pylypenko & Spasonova, 2020).

An alternative to using chemical reagents is the biological treatment method. This approach is based on the natural self-purification capacity of water bodies and the ability of plants and microorganisms to accumulate heavy metals. The high accumulative capacity of microalgae regarding heavy metals creates prospects for their use in wastewater treatment. Existing biotechnology experience indicates that accumulation efficiency can reach up to 95% (Gorshkova et al., 2015).

Bacteria capable of reducing Cr^{6+} to Cr^{3+} include species from the genera *Pseudomonas*, *Aeromonas*, and *Escherichia*. These bacteria can tolerate Cr^{6+} ion concentrations exceeding 200 mg/L, with a reduction time of 1-3 days. This time increases to 20 and 60 days, respectively, when the initial concentration of chromium compounds rises to 350 and 500 mg/L (Petruk et al., 2013; Homelia & Sagaidak, 2004).

Common disadvantages of biological methods for neutralizing spent solutions containing chromium(VI) ions include the sensitivity of microorganisms to changes in wastewater composition and increased concentrations of toxic components; significant land area requirements; insufficient treatment efficiency; and the lengthy duration of the technological process. Moreover, after treatment, chromium accumulates within the biomass, which subsequently needs to be disposed of, but now in the form of biomaterial (Petruk et al., 2013; Homelia & Sagaidak, 2004).

Thus, modern treatment methods for hexavalent chromium removal have been investigated and thoroughly reviewed. These include the use of natural sorbents, traditional chemical reduction, ion exchange, electrochemical, and biological methods. Table 2 provides a comparative analysis of the discussed treatment methods, highlighting their main advantages and disadvantages.

Conclusions and Prospects for Further Research

In conclusion, the disposal of spent chromium-containing solutions can be achieved through numerous methods. The reagent method is currently the most widespread practice in Ukraine for neutralizing electroplating wastewater. Its primary advantage lies in its extremely low sensitivity to the initial contaminant content, while its main drawback is the high residual salt content of the treated water, necessitating further purification.

Table 2. Advantages and Disadvantages of Wastewater Treatment Methods for Cr(VI)

Method	Essence of Method / Method Principle	Advantages	Disadvantages
Reagent Method	Involves converting chromium(VI) ions to the trivalent state and precipitating them as an insoluble product. The reagent method can be considered two-stage; however, after obtaining insoluble products, the pulp undergoes several more processing steps: settling and filtration through a filter press to produce sludge.	It is relatively simple to implement and does not require specialized equipment. It allows for operation across a wide range of effluent parameters (qualitative and quantitative composition, pH, etc.). Most large machine-building factories utilize this specific wastewater treatment method.	The resulting sludges are characterized not only by a complex composition but also by an amorphous gel-like structure. Subsequent filtration and drying pose a significant technical and economic problem for enterprises.
Ion-Exchange Methods	Enable the purification of spent solutions from both chromium(III) and chromium(VI) ions, allowing for the treatment of large volumes of solutions (up to hundreds of m^3/hour).	Require relatively low electricity consumption, with the possibility of full process automation.	Demand preliminary reagent treatment of spent solutions to separate mixed effluents and entail significant costs for ionite acquisition. There is also the problem of eluates, which must be further processed into disposable substances. Without addressing the problem of eluate disposal, ion-exchange purification leads to an almost threefold increase in the total amount of salt discharges.
Sorption Treatment	Highly effective and among the most environmentally friendly methods. Key parameters for material selection include sorption qualities, porosity, and cost-effectiveness. Carbon sorbents, iron compounds, and various natural biomaterials are used as sorbents for neutralizing spent chromium-containing solutions.	Purification to maximum permissible concentration (MPC) requirements; possibility of recovering sorbed substances; possibility of returning treated water to production after pH adjustment.	Low productivity of sorption units; natural sorbents are applicable for a limited range of impurities and their concentrations; cumber-some equipment; material operating limitations based on the pH range of the source water; complexity of regeneration.

Method	Essence of Method / Method Principle	Advantages	Disadvantages
Electro-chemical Methods	Chromium participates in reactions at the electrodes, primarily involving the deactivation of hexavalent chromium by its reduction to the trivalent state at the cathode. To prevent the reverse oxidation reaction at the anode, membranes and diaphragms can be used.	Speed and completeness of reduction. No sludge is formed during electrolysis.	The process requires precise adherence to the parameters of the incoming effluents, which is very difficult to achieve under real production conditions. Additionally, the effluent composition may include extraneous ions that interfere with the reduction process. Electrochemical reduction is rarely applied in real electroplating industries due to the complexity of the equipment and the overall high cost of the process.
Electro- and Galvano-coagulation Methods	In both methods, iron is first dissolved. The resulting Fe^{2+} ions then reduce Cr^{6+} to Cr^{3+}, leading to the subsequent formation of $Cr(OH)_3$.	Speed and completeness of reduction. Besides iron anodes, aluminium anodes can also be used.	The disadvantages include the use of large quantities of acid and alkali, and the formation of a significant amount of practically unusable sludge, which is a mixture of iron and chromium hydroxides. During the operation of electrocoagulators, clogging of the inter-electrode space is observed, necessitating constant cleaning with scrapers. When maintaining galvano-coagulators, it's necessary to constantly maintain the ratio of steel chips to coke or steel chips to copper chips.
Membrane Methods	Suitable for treating low-concentration spent solutions, as high-concentration effluents quickly damage membranes, and the purification quality in such cases is often low.	Membrane methods prove effective for regenerating components from spent solutions and certain types of rinse waters after technological operations.	In real-world conditions, similar to electrochemical treatment methods, maintaining precisely defined effluent parameters is difficult. These methods are also quite expensive to operate. Membranes are rather scarce and sensitive to changes in the techno-logical characteristics of spent solutions.

Method	Essence of Method / Method Principle	Advantages	Disadvantages
Biological Methods	An alternative to using chemical reagents. This method is based on the self-purification of water bodies and the ability of plants and microorganisms to accumulate heavy metals. The high accumulative capacity of microalgae regarding heavy metals creates prospects for their use in wastewater treatment.	Low energy consumption, absence of secondary water pollution, relatively low operating costs, and the ability to meet stringent discharge standards. Existing biotechnology experience shows that accumulation efficiency can reach up to 95%.	Sensitivity of microorganisms to changes in wastewater composition and increased concentrations of toxic components; significant land area requirements; insufficient treatment effect; and lengthy technological processes. Additionally, after purification, chromium accumulates within the biomass, which then requires further disposal, but now in the form of a biomaterial.

The high toxicity of sulfide-alkaline solutions and the impossibility of their direct discharge into water bodies and soils compel the research and development of alternative, resource-saving technologies that generate minimal waste.

An analysis of modern treatment methods reveals that the sorption method is the most optimal, considering both technical-economic indicators and environmental criteria. This method can significantly reduce the concentration of chromium ions, even from solutions where ion concentrations are low and other methods are nearly ineffective. Natural aluminosilicates such as zeolites, bentonite clays, and montmorillonite minerals exhibit good sorption properties.

Detailed studies have shown that composite sorbents display better sorption properties for chromium than pure nanoscale iron. This is attributed to the inclusion of clay minerals during synthesis, which enhances the sorption capacity of the resulting composites by increasing their dispersity due to reduced agglomeration of nanoscale iron particles, thereby increasing the specific surface area of the modified samples. Prospects for further research include the search for and testing of new sorbents derived from more accessible natural materials.

To enhance environmental safety, significant attention must be paid to investigating the ion-exchange method for processing and utilizing chromium-containing regeneration solutions. This method allows for the creation of environmentally friendly technologies and the isolation of chromates as valuable products, enabling their return to technological processes.

Thus, the results of the analysis indicate that electrocoagulation using hybrid Fe-Al electrodes is a highly effective method for reducing Cr(VI) concentrations to below 0.3 mg/L, achieving 97% removal (Gao et al., 2005). At the same time, despite the significant efficiency of Cr(VI) removal, the regeneration of chromium in the form of $Cr(OH)_3$ is limited due to the complexity of its subsequent extraction and sludge processing. This underscores the importance of further research aimed at improving technological solutions that not only remove chromium from wastewater but also ensure its effective reuse in production processes, fostering a transition to environmentally clean and resource-efficient technologies.

REFERENCES

1. Barakat, M. A. (2010). New trends in removing heavy metals from industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 4(4), 361–377. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2010.07.019
2. Bashir, N. (2021). Chromium (VI) removal methods from effluents - A review article. *University of Khartoum Engineering Journal*, 11, 700. https://doi.org/10.53332/kuej.v11i2.700
3. Beukes, J. P., Pienaar, J. J., Lachmann, G., & Giesekke, E. W. (1999). The reduction of hexavalent chromium by sulphite in wastewater. *Water SA*, 25(3), 363–370.
4. Gao, P., Chen, X., & Shen, F. (2005). Removal of chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology*, 43(2), 117–123. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.10.008
5. Genawi, N., Ibrahim, M., El-Naas, M., & Alshaik, A. (2020). Chromium removal from tannery wastewater by electrocoagulation: Optimization and sludge characterization. *Water*, 12(5), 1374. https://doi.org/10.3390/w12051374
6. Gitet, H., Subramanian, P. A., Woldemariam, D., Tesfu, T., Belay, M. H., Gebreegziabher, G. G., & Desta, K. T. (2013). Speciation of chromium in soils near Sheba Leather Industry, Wukro Ethiopia. Talanta, 116, 10.1016/j.talanta.2013.07.039.
7. Gorshkova, G. O., Gudzenko, T. V., Ivanicya, V. O., & Volyuvach, O. V. (2015). A method of purifying water from chromium (VI) in the presence of microorganisms. *ScienceRise: Scientific Journal*, (9), 57–60.
8. Homelia, M. D., Hlushko, O. V., & Radovenchyk, V. M. (2002). Vyvchennia protsesiv ochystky vody vid khromativ na anioniti AV-17-8 [Study of water purification processes from chromates on anion exchanger AV-17-8]. *Ekotekhnolohyy y resursosberezhenye*, (4), 41–44.
9. Homelia, M. D., & Sahaidak, I. S. (2004). Pererobka ta utylizatsiia khromovmisnykh vidkhodiv [Processing and utilization of chromium-containing wastes]. In *Zbirnyk naukovykh statei do V Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy zboru, pererobky ta utylizatsii vidkhodiv»* (p. 488). OTsNTEI.
10. Homelia, M. D., Shablii, T. O., & Nosachova, Y. V. (2012). Methodical instructions for laboratory work on the course “Physicochemical foundations of water purification processes. Part 1. Reagent methods of water purification” for students of the training program 6.040106 “Ecology, environmental protection and sustainable nature management”. NTUU “KPI”.
11. Jung, C., Heo, J., Han, J., Her, N., Lee, S.-J., Oh, J., Ryu, J., & Yoon, Y. (2013). Hexavalent chromium removal by various adsorbents: Powdered activated carbon, chitosan, and single/multiwalled carbon. *Separation and Purification Technology*, 106, 63–71. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.12.028
12. Kennedy, D. (2003). The 'Erin Brockovich effect': How media shapes toxics policy. *Environs*, 26, 219-232.
13. Liniucheva, O. V., Yatsiuk, L. A., Motroniuk, T. I., Buket, O. I., & Frolenkova, S. V. (2017). Halvanotekhnika. Proektuvannia halvanichnykh vyrobnytstv: navch. posib. [Electroplating. Design of electroplating production: Textbook]. KPI im. Ihoria Sikorskoho.
14. Petruk, V. H., Severyn, L. I., Vasylkivskyi, I. V., & Bezvoziuk, I. I. (2014). Pryrodookhoronni tekhnolohii. Navchalnyi posibnyk. Ch. 2: Metody ochyshchennia stichnykh vod [Environmental technologies. Textbook. Part 2: Wastewater treatment methods]. VNTU.
15. Petruk, V. H., Vasylkivskyi, I. V., Bezvoziuk, I. I., Petruk, R. V., & Turchyk, P. M. (2013). Pryrodookhoronni tekhnolohii. Navchalnyi posibnyk. Ch.3: Metody pererobky osadiv stichnykh vod [Environmental technologies. Textbook. Part 3: Methods of wastewater sludge processing]. VNTU.
16. Pylypenko, I. V., & Spasonova, L. M. (2020). Vyluchennia khromu (VI) z vodnykh rozchyniv kompozytamy na osnove montmorylonitu ta oksydu zaliza [Removal of chromium (VI) from water solutions by means of composites based on montmorillonite and iron oxide]. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*, (4), 121–127.
17. Shekhawat, A., Kahu, S., Saravanan, D., & Jugade, R. (2015). Synergistic behaviour of ionic liquid impregnated sulphate-crosslinked chitosan towards adsorption of Cr(VI). *International Journal of Biological Macromolecules*, 80, 615–626.

18. Shinde, D. R., Pawar, R. A., & Chaskar, M. G. (2018). Removal of Cr(VI) from the Chrome Electroplating Effluent by Reduction and Adsorption using Powdered Activated Charcoal. *Oriental Journal of Chemistry*, 34(1), 493–501. https://doi.org/10.13005/ojc/340154
19. Suvorin, O. V., Shorokhov, M. M., & Ozheredova, M. A., & Zubtsov, Y. I. (2019). Vysokoefektyvna tekhnolohiia zneshkodzhennia Cr (VI)-vmisnykh promyvnykh vod elektrokhimichnykh vyrobnytstv [Highly effective technology for the decontamination of Cr (VI)-containing rinse waters from electrochemical production]. *Problems of Environmental Protection and Technogenic Safety*, 4(2019), 185446. https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2019.185446
20. Vukĉević, M., Marković, J., Ristić, M., Radovanović, Z., Milojković, A., Marinović, M., & Veličković, S. (2014). Carbon materials from waste shot hemp fibers as a sorbent for heavy metal ions – Mathematical modeling of sorbent structure and ions transport. *Chemical Engineering Journal*, 235, 284–292. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.047
21. Ying, Z., Ren, X., Li, J., Wu, G., & Wei, Q. (2020). Recovery of chromium(VI) in wastewater using solvent extraction with amide. *Hydrometallurgy*, 196, 122221. https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105440

The article was received 30.06.2025 and was accepted after revision 05.09.2025

С.С. Порошенко, О.П. Хохотва

ПЕРЕДОВІ РЕСУРСОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИДАЛЕННЯ ХРОМУ (VI) З ПРОМИСЛОВИХ СТІЧНИХ ВОД: АНАЛІЗ ТА ПОТЕНЦІАЛ ПОВТОРНОГО ВИКОРИСТАННЯ

Анотація. Дослідження стосується наукового та практичного завдання – дослідження сучасних методів очищення стічних вод, забруднених шестивалентним хромом (Cr(VI)), з акцентом на розробку екологічно безпечних та ресурсоефективних технологій. У статті аналізуються ключові підходи до очищення гальванічних стічних вод, включаючи хімічне осадження, електрокоагуляцію та гальванокоагуляцію, іонний обмін, мембранну фільтрацію, сорбцію та біологічні методи. Оцінено переваги, обмеження, ефективність та економічну доцільність кожного методу. Особлива увага приділяється технологіям, що видаляють Cr(VI) зі стічних вод та дозволяють відновлювати або повторно використовувати екстраговані компоненти в промислових процесах. Розглянуто перспективи застосування природних та синтетичних сорбентів, процесів іонного обміну для отримання цінних продуктів, а також електрохімічних та біологічних підходів як альтернатив традиційним хімічним методам. Обґрунтовано розвиток технологій замкнутого циклу як перспективний напрямок мінімізації впливу промислових стічних вод на навколишнє середовище.

Ключові слова: стічні води, хром (VI), очищення води, ресурсозбереження, повторне використання, сорбційні методи, іонний обмін, електрохімічне очищення, біологічне очищення, утилізація відходів, екологічно чисті технології.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 05.09.2025

Порошенко Сергій Сергійович
аспірант, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: Берестейський просп., 37, м. Київ, Україна, 03056
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0001-8258-8033 ***e-mail:*** s.poroshenko@kpi.ua

Хохотва Олександр Петрович
д-р техн. наук, доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: Берестейський просп., 37, м. Київ, Україна, 03056
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2607-9242 ***e-mail:*** khokhotva@bigmir.net

УДК 628.33:621.311:504

Andrii Redko, postgraduate student
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0221-6908 ***e-mail:*** redko.geo@gmail.com

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ECO-ENERGY POTENTIAL OF EXPLODED QUARRIES AND RISKS OF ITS USE

Annotation. *Aim of paper to propose a semi-quantitative model for rapidly ranking disturbed industrial lands closed quarries as candidate sites for utility-scale solar plants or renewable «energy parks», explicitly accounting for engineering constraints and environmental–permitting risks. Method the study introduces a pre-feasibility multi-criteria screening framework and an integrated EEP score (0-100) computed from expert-rated components that reflect: solar conditions and terrain shading, geotechnical suitability, grid-connection feasibility, environmental restrictions and permitting effort, and logistics and site-related capital costs. Input evidence is derived from open-access sources and translated into risk-adjusted indicators relevant to eco-engineering decision-making. Findings – the framework was tested on two quarry sites in Ivano-Frankivsk region. The Dubivtsi site achieved EEP≈59 (moderate attractiveness) while a stricter «stop-factor» formulation yielded* EEP_{geo}*≈45, indicating barriers requiring mitigation. The Yamnitsa site demonstrated higher feasibility with EEP≈68 and* EEP_{geo}*≈46, primarily due to improved geotechnical conditions and less risky grid integration. Theoretical novelty – the paper operationalises the notion of «ecoenergy» renewable potential on degraded land by combining resource availability with infrastructure readiness and risk exposure within a single, transparent scoring construct. Practical implications – the approach supports a 1-2 week desktop screening to prioritise sites, pinpoint dominant constraints (typically grid and geotechnics), and justify targeted field investigations and EIA scoping before full feasibility studies. Originality – the proposed EEP scale and the complementary geometric («hard») aggregation enhance repeatability and penalise critical blockers, improving early-stage comparability of quarry sites. Future research should calibrate weights against realised projects, embed hydrological and slope-stability submodels.*
Keywords: *multi-criteria screening; eco-energy potential of disturbed lands; geotechnical stability; solar generation.*

А. Редько

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

ЕКОЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ВІДПРАЦЬОВАНИХ КАР'ЄРІВ І РИЗИКИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Анотація. *Мета дослідження – розробити модель швидкого порівняння техногенно порушених територій (відпрацьованих кар'єрів) за придатністю до розміщення сонячних електростанцій чи енергопарків з урахуванням ключових інженерних та еколого-правових ризиків. Запропонований підхід ґрунтується на багатокритеріальному скринінгу перед техніко-економічним обґрунтуванням з формуванням інтегрального індексу екоенергетичного потенціалу EEP (0-100), який агрегує експертні оцінки п'яти груп чинників:*

© А. Редько, 2025

сонячні умови та затінення, геотехнічна придатність, мережеве приєднання, екологічні обмеження, логістика та капітальні витрати. Вхідні параметри отримувалися з відкритих джерел та інтерпретувалися з позицій інженерно-екологічної безпеки. Результати апробовано на двох кар'єрах Івано-Франківської області: для ділянки поблизу с. Дубівці отримано EEP≈59 (помірна привабливість) і EEP_{geo}≈45 (наявність блокуючих чинників), для кар'єру поблизу с. Ямниця – EEP≈68 і EEP_{geo}≈46, що свідчить про вищий екоенергетичний потенціал кар'єру за рахунок кращої геотехніки та умов приєднання. Наукова новизна дослідження полягає у формалізації поняття екоенергетичний потенціал кар'єру на деградованих землях через інтеграцію ресурсних, інфраструктурних і ризикових компонентів в одному індексі. Практичне значення проведених досліджень – можливість за 1-2 тижні виконати ранжування кар'єрів, визначити проблемні місця та обґрунтувати пріоритетність детальних вишукувань і оцінки впливу на довкілля. Запропонована шкала EEP та «жорсткий» геометричний варіант, які підсилюють вплив стоп-факторів і підвищують відтворюваність попереднього відбору майданчиків. Перспективи подальших досліджень – калібрування ваг за статистикою реалізованих проєктів, деталізація геотехнічних і гідрогеологічних підмоделей.

Ключові слова: *багатокритеріальний скринінг; екоенергетичний потенціал порушених земель; геотехнічна стійкість; сонячна генерація.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.69-81

Вступ

Енергетика є однією з визначальних галузей економіки будь-якої країни, а стабільне та ефективне енергозабезпечення безпосередньо впливає на економічне зростання та сталий розвиток держави [1].

Зважаючи на тенденції сьогодення, все більша увага приділяється використанню альтернативних видів енергетичних ресурсів [2]. Енергетична диверсифікація дозволить суттєво зменшити енергетичну залежність України, підвищити рівень економічної, національної та екологічної безпеки і, відповідно, сприятиме економічному зростанню [3].

Розміщення сонячних електростанцій у відпрацьованих кар'єрах сьогодні вважається одним із найбільш перспективних напрямів повторного використання техногенно порушених територій [4].

У науковій літературі останніх років з'явилися роботи, присвячені цій тематиці. Зокрема, у роботі автора [5] дослідили можливість перетворення покинутих кар'єрів на сонячні ферми у США. Вони проаналізували 18 закинутих гірничих ділянок у штатах Флорида та Пенсильванія і виявили можливість встановлення СЕС, здатних генерувати до ~22% річного попиту електроенергії цілого штату Флорида. Автори застосували ГІС-моделювання з урахуванням критеріїв площі, ухилів, орієнтації, близькості до мереж тощо, і дійшли висновку, що рекультивація кар'єрів під СЕС може істотно сприяти досягненню чистоенергетичних цілей регіону.

У науковій роботі [6] проведено огляд методів рекультивації відпрацьованих кар'єрів в Англії. Автори розглянули різні технічні прийоми відновлення ландшафту (виположування укосів, зворотна засипка виїмок, терасування уступів зі створенням ґрунтового покриву тощо) та біологічні підходи (насадження рослинності або залишення території для природної сукцесії). Зазначено, що традиційна рекультивація забезпечує стабілізацію

схилів і поступове відновлення екосистем, проте остаточне використання рекультивованих кар'єрів зазвичай обмежується пасовищами, лісами чи рекреаційними зонами з невисокою господарською цінністю.

У роботі [7] автор оцінив переваги й обмеження встановлення фотоелектричних станцій на відвалах гірничих підприємств (шахтних териконах) у Європі. Дослідник відзначає, що розміщення сонячних панелей на відпрацьованих породних відвалах є одним з найкращих екологічних та економічних варіантів повторного використання земель, хоча реалізовано ще небагато таких проєктів порівняно з наявним потенціалом. Серед головних технічних чинників названо крутизну схилів відвалів, яка виступає основним обмеженням для монтажу панелей, потребуючи спеціальних інженерних рішень для довготермінової стабільності конструкцій. Водночас наведено успішні приклади встановлення СЕС на відвалах у Франції, що підтверджують реалізованість цієї ідеї на практиці.

У багатьох країнах території відпрацьованих кар'єрів перетворюють на енергопарки [8]. Наприклад, в США великі сонячні парки побудовані в кар'єрах Аризони та Невади, в Польщі на даний час відбувається реконверсія вугільних кар'єрів у регіоні Сілезія. Європейський Союз офіційно рекомендує цей підхід як зелений механізм рекультивації земель, що відповідає Green Deal, ESG-стандартам та Водній рамковій директиві [9].

Тож для України є майбутні перспективи. Особливо перспективні області: Івано-Франківська, Львівська, Дніпропетровська, Київська, Полтавська, де зосереджено найбільше кар'єрів.

Але виникає питання, як порівняти відпрацьовані кар'єри за їх екоенергетичним потенціалом.

Мета наукового дослідження: запропонувати модель оцінки екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар'єрів.

Теоретичні основи дослідження

Окрім переваг розміщення відновлюваних джерел енергії у відпрацьованих кар'єрах (табл. 1), існують суттєві ризики, в тому числі екологічні. Об'єкти «зеленої» енергетики необхідно розглядати в розрізі кількох категорій, таких як: зміна якості атмосферного повітря, вплив на поверхневі та підземні води, вплив на геологію, ґрунти та землекористування, вплив на ландшафти та біорізноманіття; вплив на суспільні та соціально-економічні аспекти, вплив на культурно-туристичну спадщину [10]. Лише зваживши переваги та недоліки таких впливів, чи їх повну відсутність можна визначити найбільш придатну територію для улаштування того чи іншого «зеленого» енергетичного об'єкта [11].

Однак кар'єри мають свої особливі технічні умови, які потребують врахування [12]. Серед головних:

- нестабільність укосів та потреба в постійному геотехнічному контролі;
- можливість підтоплення вимагатиме улаштування дренажних систем;
- зміна мікроклімату в котловинах потребує додаткових досліджень (наприклад, наявні температурні інверсії сприятимуть ефективності роботи сонячних панелей);
- необхідний підбір монтажних систем з урахуванням великих перепадів висот.

Таблиця 1. Переваги розміщення СЕС у відпрацьованих кар'єрах

Напрям	Переваги
Екологічний	Рекультивація порушених земель без додаткового вилучення с/г угідь або природних територій. Зниження пилового та ерозійного ризику завдяки стабілізації поверхні. Використання деградованих земель як екологічно прийнятна альтернатива.
Інфраструктурний	Великі відкриті площі, мінімальне затінення. Вже наявні під'їзні шляхи та електричні підстанції (які використовувались у видобутку). Можливість розміщення обладнання в кар'єрі нижче рівня рельєфу сприятиме зменшенню вітрових навантажень.
Економічний	Низька вартість землі або відсутність плати за оренду для підприємств. Підвищення інвестиційної привабливості для регіону. Можливість залучення «зеленого» фінансування та грантів ЄС.
Соціальний	Нові робочі місця замість втраченої видобувної діяльності. Зменшення негативного впливу на населення, оскільки кар'єри зазвичай мали більший екологічний вплив ніж ВДЕ.

Методика дослідження

Нами запропонована наступна модель для порівняння кар'єрів за їх екоенергетичним потенціалом. Базові оцінки варіюються у діапазоні від 0 до 100, які дають простий рейтинг: 0 – «нульовий екоенергетичний потенціал», 100 – «максимально можливий екоенергетичний потенціал».

Наприклад, нехай для кар'єру i ми маємо 5 базових нормованих оцінок (кількість оцінок може бути збільшена):

S_i – сонячний потенціал та затінення;

G_i – геотехнічні особливості території (стабільність та придатність до улаштування СЕС);

M_i – віддаленість електромереж та складність приєднання;

E_i – екологічні обмеження та дозволи;

L_i – логістика та проєкт капітальних затрат.

Кожна оцінка виставляється експертним шляхом в діапазоні 0…10.

Тоді модель оцінки екоенергетичного потенціалу матиме вигляд:

$$EEP_i = 100 \times (0{,}25S_i + 0{,}20G_i + 0{,}25M_i + 0{,}15E_i + 0{,}15L_i). \quad (1)$$

Таким чином, враховуючи при впровадженні відновлюваних джерел енергії у відпрацьованих кар'єрах всі критерії ризику, можна виокремити його екоенергетичний потенціал, збільшити енергетичну, туристичну, а, як наслідок, і економічну вигоду при мінімальних впливах на рівень екологічної безпеки [13].

Результати дослідження

З метою опробування запропонованої моделі на реальних кар'єрах, візьмемо для порівняння два об'єкти. Для отримання інформації та статистичних характеристик об'єктів використаємо доступні відкриті джерела: Google map, Глобальний сонячний атлас [14].

Перша ділянка розташована в околицях с. Дубівці (Івано-Франківська область) (рис. 1).

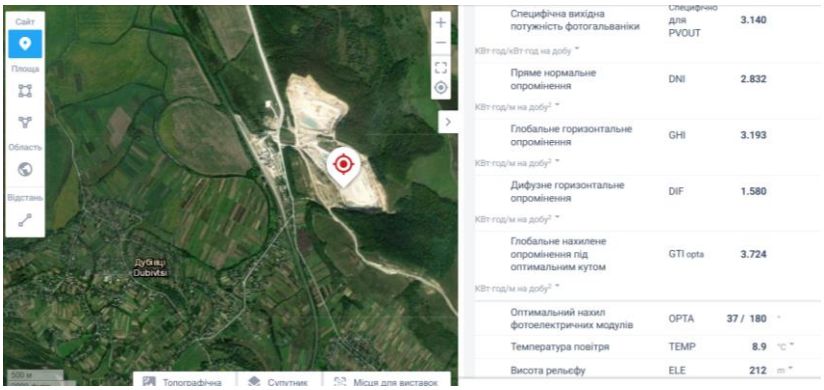


Рис. 1. Супутникове зображення кар'єру поблизу населеного пункту Дубівці Івано-Франківської області, із зазначенням її геолокації для оцінки можливості будівництва сонячної електростанції

Цей кар'єр відкрили ще у 1964 році. Виділена зона характеризується відкритою незабудованою територією. Промислова ділянка знижує ризики затінення та потенційний конфлікт землекористування.

У правій частині рисунка наведені розраховані енергетичні та кліматичні параметри згідно з даними Глобального сонячного атласу [14]. Дана ділянка має наступні характеристики:

1. Специфічна вихідна потужність для потенційної СЕС, яка дорівнює 3,140 кВт×год./кВт на добу визначає середньодобовий потенційний виробіток електроенергії з 1 кВт встановленої потужності.
2. Пряме нормальне опромінення для даної ділянки складає 2,832 кВт×год./м² на добу. Цей показник важливий для систем із сонячними трекерами.
3. Глобальне горизонтальне опромінення складає 3,193 кВт×год./м² на добу. Це загальний рівень сонячної радіації на горизонтальній поверхні.
4. Дифузне горизонтальне опромінення дорівнює 1,580 кВт×год./м² на добу. Це частка розсіяної сонячної енергії, яка також частково вловлюється сонячними панелями.
5. Глобальне нахилене опромінення під оптимальним кутом дорівнює 3,724 кВт×год./м² на добу. Це забезпечує максимальний енергетичний ефект при монтажі модулів під оптимальним кутом.
6. Оптимальний нахил фотоелектричних модулів: 37°.
7. Середньорічна температура повітря: 8,9°C загалом сприятлива для ефективної роботи сонячних панелей.
8. Висота рельєфу обраної ділянки: 212 м над рівнем моря.

Картографічний матеріал містить топографічні дані з супутникового режиму відображення, що дозволило також оцінити морфологію території, структуру землекористування та відсутність щільної забудови в зоні інтересу [15].

Отримані значення інсоляції свідчать про високий потенціал сонячної генерації у межах досліджуваної ділянки та доцільність її використання для розміщення фотоелектричних модулів. З важливих ризиків, які потрібно врахувати при розрахунку, наявний несприятливий рельєф: кар'єр знаходиться у котловані, тому при розміщенні СЕС потрібно враховувати потенційне затінення від бортів [16]. Для умов Західної України це добрий ресурс.

Підтвердимо оцінку розрахунком моделі.

Сонячний ресурс + затінення:

$$S = 0{,}88 \times (1 - 0{,}12) = 0{,}77. \quad (2)$$

Враховано співвідношення максимального можливого у цьому кар'єрі сонячного ресурсу до максимального можливого серед кар'єрів у регіоні як 0,88. Затінення (борти кар'єру, ранкові/вечірні години) обраховано як 12%.

Геотехнічний ризик:

$$G = 0{,}6 \times (1 - 0{,}25) = 0{,}45. \quad (3)$$

Наявність супутникового знімку дозволила оцінити придатну для улаштування СЕС площу на рівні 60% від загальної площі кар'єру. Геотехнічний ризик (зсуви, осідання) обґрунтовано на рівні *Rgeo* = 0.25. У цьому відпрацьованому кар'єрі частина терас стабільна, у центральній частині присутні активні укоси.

Мережеве приєднання:

$$M = (1 - 0{,}3) \cdot e^{-\frac{6}{10}}; \quad (4)$$

$$M = 0{,}7 \times 0{,}55 = 0{,}39. \quad (5)$$

Нами було оцінено мережеве приєднання до загальної електросистеми типово для сільської місцевості. У даному випадку відстань до ПС 35/110 кВ складає близько 6 км. Характерна відстань $d_0 = 10$ км. Наявний мережевий ризик (оскільки невідома пропускна здатність), тому R_{grid} = 0,3. Низький коефіцієнт цього показника M = 0,39 – це типовий «слабкий пункт» кар'єрів.

Екообмеження:

$$E = 1 - 0{,}20 = 0{,}80. \quad (6)$$

Аналіз супутникових знімків дозволив встановити наступне: природно-заповідні території в межах ділянки відсутні, водойми не простежуються, поруч знаходяться сільськогосподарські угіддя [17]. Можна передбачити стандартну процедуру ОВД.

Логістика оцінена як:

$$L = 0{,}60. \quad (7)$$

Враховано наступні фактори: є під'їзди, проведені значні земляні роботи, висока запиленість території збільшить поточні затрати. Кар'єр потребує дренажу перед встановленням СЕС.

Підсумковий індекс (зважена сума):

$$EEP = 100 \times (0{,}25 \times 0{,}77 + 0{,}2 \times 0{,}45 + 0{,}25 \times 0{,}39 + 0{,}15 \times 0{,}80 + 0{,}15 \times 0{,}60) = 59. \quad (8)$$

Або більш «жорсткий» варіант (логарифмічний):

$$EEP_{geo} = 10 \times (0{,}77^{0{,}25} + 0{,}45^{0{,}20} + 0{,}39^{0{,}25} + 0{,}80^{0{,}15} + 0{,}60^{0{,}15}) = 44{,}7. \quad (9)$$

Інтерпретація результату подана в табл. 2.

Таблиця 2. Інтерпретація результату розрахунку моделі

Значення	Інтерпретація
$EEP \approx 59$	Середній потенціал, можливий проєкт. Кар'єр придатний для СЕС, найкращий сценарій: 10–20 МВт, каскадне розміщення на терасах
$EEP_{geo} \approx 45$	Є блокери, потрібна оптимізація. Електромережа і геотехніка – ключові ризики

Розглянемо другу ділянку. Також кар'єр в безпосередній близькості від міста Івано-Франківська у с. Ямниця (рис. 2).

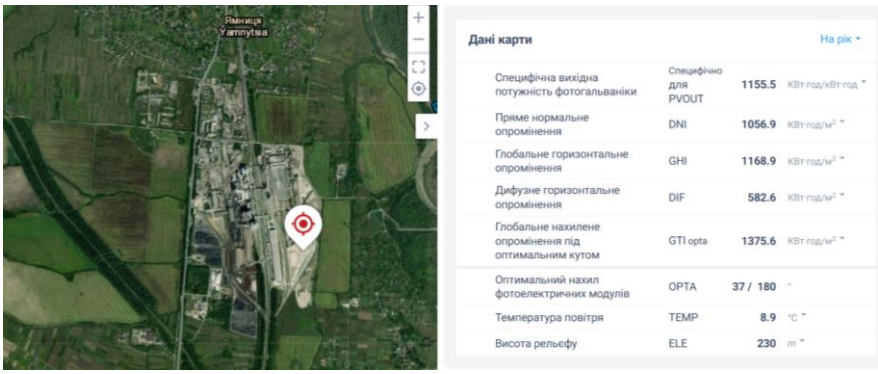


Рис. 2. Супутникове зображення кар'єру поблизу с. Ямниця із зазначенням її геолокації для оцінки можливості будівництва сонячної електростанції

У правій частині рисунка наведені розраховані енергетичні та кліматичні параметри згідно з даними Глобального сонячного атласу. Дана ділянка має наступні характеристики:

1. Специфічна вихідна потужність для потенційної СЕС, яка дорівнює 1155,5 кВт×год./кВт у рік визначає середньорічний потенційний виробіток електроенергії з 1 кВт встановленої потужності.
2. Пряме нормальне опромінення для даної ділянки складає 1056,9 кВт×год./м². Цей показник важливий для систем із сонячними трекерами.
3. Глобальне горизонтальне опромінення складає 1168,9 кВт×год./м². Це загальний рівень сонячної радіації на горизонтальній поверхні.
4. Диффузне горизонтальне опромінення дорівнює 582,6 кВт×год./м². Це частка розсіяної сонячної енергії, яка також частково вловлюється сонячними панелями.
5. Глобальне нахилене опромінення під оптимальним кутом дорівнює 1375,6 кВт×год./м². Це забезпечує максимальний енергетичний ефект при монтажі модулів під оптимальним кутом.
6. Оптимальний нахил фотоелектричних модулів: 37°/180°.

7. Середньорічна температура повітря: 8.9°C загалом сприятлива для ефективної роботи сонячних панелей.

8. Висота рельєфу обраної ділянки: 230 м над рівнем моря.

Картографічний матеріал містить топографічні дані з супутникового режиму відображення, що дозволило також оцінити морфологію території, структуру землекористування та відсутність щільної забудови в зоні інтересу.

Отримані значення інсоляції свідчать про високий потенціал сонячної генерації у межах досліджуваної ділянки та доцільність її використання для розміщення фотоелектричних модулів.

Підтвердимо оцінку розрахунком моделі.

Сонячний ресурс + затінення:

$$S = 0{,}8896 \times (1 - 0{,}10) = 0{,}8006. \quad (10)$$

Враховано співвідношення максимального можливого у цьому кар'єрі сонячного ресурсу до максимального можливого серед кар'єрів у регіоні як 0,8896. Затінення (борти кар'єру, ранкові/вечірні години) обраховано як 10%, оскільки кар'єр менш глибокий, ніж попередній.

Геотехнічний ризик:

$$G = 0{,}70 \times (1 - 0{,}20) = 0{,}56. \quad (11)$$

Наявність супутникового знімку дозволила оцінити придатну і стабільну для улаштування СЕС площу на рівні 70% від загальної площі кар'єру. Геотехнічний ризик (зсуви, осідання) обґрунтовано на рівні $Rgeo$ = 0,2. У цьому відпрацьованому кар'єрі більша частина терас стабільна.

Мережеве приєднання:

$$M = (1 - 0{,}25) \times e^{-\frac{3}{10}} = 0{,}5556. \quad (12)$$

Нами було оцінено мережеве приєднання до загальної електросистеми типово для сільської місцевості. У даному випадку відстань до ПС 35/110 кВ складає близько 3 км. Характерна відстань $d_0 = 10$ км. Наявний мережевий ризик, тому R_{grid} = 0,25.

Екообмеження

$$E = 1 - 0{,}15 = 0{,}85. \quad (13)$$

Аналіз супутникових знімків дозволив встановити наступне: природно-заповідні території в межах ділянки відсутні, водойми не простежуються, поруч промислова територія та антропогенний вплив, тому тут ризик нижчий, ніж у попередньому варіанті. Можна передбачити стандартну процедуру ОВД.

Логістика оцінена як:

$$L = 0{,}70. \quad (14)$$

Враховано наступні фактори: є під'їзди, логістична карта є кращою у зв'язку із близькістю до обласного центру, нижча запиленість території, ніж у попередньому випадку.

Підсумковий індекс (зважена сума):

$$EEP = 100 \times (0{,}25 \times 0{,}80 + 0{,}20 \times 0{,}56 + 0{,}25 \times 0{,}55 + 0{,}15 \times 0{,}85 + 0{,}15 \times 0{,}7) = 68{,}2. \quad (15)$$

Або більш «жорсткий» варіант (логарифмічний):

$$EEP_{geo} = 10 \times (0{,}80^{0{,}25} + 0{,}56^{0{,}20} + 0{,}55^{0{,}25} + 0{,}85^{0{,}15} + 0{,}70^{0{,}15}) = 46{,}22. \quad (16)$$

Цей кар'єр виглядає кращим за попередній (де екоенергетичний потенціал дорівнював 59) через трохи вищу інсоляцію, краще підключення до мереж, кращі умови геотехніки.

Отже, оцінку екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар'єрів під сонячні електростанції чи енергопарки зручно робити як багатокритеріальний скринінг перед техніко-економічним обґрунтуванням проєкту.

Такий скринінг може бути досить швидким із використанням запропонованої моделі (1-2 тижні на 1 об'єкт). Оцінювання ризиків для їх застосування у моделі діючого та перспективно рекультивованого кар'єру варто виконувати у кілька етапів:

1. Ідентифікація природних і техногенних небезпек за матеріалами геологічних, гідрогеологічних та гірничотехнічних досліджень, супутникових знімків і топографічних карт.
2. Виділення чутливих рецепторів довкілля (населення навколишніх сіл, ґрунтово-берегові комплекси, поверхневі та підземні води, транспортна інфраструктура, біота).
3. Напівкількісна оцінка ризиків за матрицею «ймовірність – масштаб наслідків» (5-10-бальна шкала), з ранжуванням ризиків на неприйнятні, керовані та прийнятні.
4. Формування карти ризиків кар'єру з урахуванням зон впливу пилу, шуму, можливих зсувів, затоплення тощо.

Ризики розглянемо детально на прикладі другого кар'єру в с. Ямниця.

Геологічні та гідрогеомеханічні. Кар'єр розташований у долинно-рівнинному ландшафті з наявністю алювіальних та делювіальних відкладів, поблизу долини річки Бистриця. Основні небезпеки: нестійкість бортів кар'єру, зсуви та обвали. Порушення природної рівноваги схилів, наявність тектонічної тріщинуватості, сезонне перезволоження та сейсмічність регіону (Карпатський пояс, інтенсивність до 7 балів за MSK-64) підвищують імовірність локальних обвалів порід. Ризик зростає при подальшому заглибленні кар'єру. Це загрожує техніці, персоналу й інфраструктурі. Спостерігається деформація прилеглих територій. Гірничі роботи створюють поля розвантаження, що можуть викликати осідання або мікрозсуви на межі кар'єру та сільськогосподарських угідь, залізничної гілки і проммайданчика заводу. За матричним підходом ці ризики відносяться до категорії високих для періоду активної експлуатації й потребують постійного геодезичного та геотехнічного моніторингу (контроль деформацій, інклінометрія, сейсмомоніторинг).

Гідрогеологічні та водно-екологічні ризики для використання екоенергетичного потенціалу кар'єру. Порушення поверхневого стоку та підтоплення. Відвали та внутрішні дороги змінюють схему дренування, що може спричинити локальне підтоплення прилеглих орних земель і прискорення ерозії ярів.

Забруднення підземних і поверхневих вод. Потенційні шляхи – інфільтрація через відвали пилоподібної фракції цементної сировини, витоки паливно-мастильних матеріалів, шламів, стічних вод з проммайданчика. За умов гідравлічного зв'язку з річковою долиною існує ризик перенесення забруднювачів у напрямку питних децентралізованих водозаборів населених пунктів нижче за течією.

Ці ризики оцінюються як середні-високі; для їхнього зниження необхідні протифільтраційні екрани в зонах зберігання паливно-мастильних матеріалів, локальні очисні споруди дощового стоку, контроль хімічного складу ґрунтових і поверхневих вод.

Атмосферне повітря, шум та здоров'я населення. Населений пункт Ямниця та приміські території Івано-Франківська знаходяться в зоні впливу пилогазових викидів пилу цементної сировини та викидів спеціалізованої техніки. Дроблення, навантаження/розвантаження й транспортні операції формують високі концентрації завислих частинок PM10-PM2,5. При несприятливих метеоумовах (штиль, інверсія) ймовірне перенесення пилу на житлову забудову, що підвищує ризики респіраторних захворювань, хронічних бронхітів, алергій. Пил забруднюватиме сонячні панелі, що потребуватиме додаткових капіталовкладень для їх очищення з метою підтримки роботи встановленої потужності.

Шум і вібрації. Вибухові роботи, робота екскаваторів, дробарок і залізничних составів створюють акустичне навантаження, яке потенційно може перевищувати нормативні значення в санітарно-захисній зоні. За оцінкою за шкалою «ймовірність-наслідки» ці ризики для населення середні, але при порушенні санітарних розривів можуть ставати високими. Потрібні пилогазоочисні системи, укриття конвеєрів, зрошення технологічних доріг, шумозахисні екрани та регулярний медико-санітарний моніторинг.

Ландшафтно-екологічні та соціальні ризики. Потенційний ризик втрати ґрунтового покриву та біорізноманіття. Зняття родючого шару та формування кар'єру призводять до деградації ґрунтів і фрагментації екосистем, скорочення площ природних та агроландшафтів. Зміна візуального ландшафту. Кар'єр і відвали формують різкий техногенний контраст у структурі ландшафту, що знижує рекреаційну привабливість території й може викликати соціальну напругу.

Транспортні ризики. Зростання інтенсивності вантажопотоків у період будівництва (кар'єр – завод – залізнична станція) збільшує ризик дорожньо-транспортних пригод, шумового навантаження та руйнування місцевих доріг.

Ці ризики кваліфікуються як середні, але вони мають кумулятивний характер і проявляються в середньо- та довгостроковій перспективі.

Специфічні ризики при розміщенні сонячних електростанцій у відпрацьованому кар'єрі. З огляду на перспективу трансформації кар'єру в майданчик для фотоелектричних станцій, необхідно врахувати додаткові аспекти. По-перше, геотехнічна стійкість основи для опор СЕС. Нерівномірне ущільнення відвалів, наявність тріщин і зсувонебезпечних ділянок може спричинити деформацію конструкцій. Потрібні інженерно-геологічні вишукування, моделювання напружено-деформованого стану й вибір оптимальної схеми фундаментів (палеві, анкерні).

Затоплення та підтоплення панелей. При можливому формуванні кар'єрного озера необхідно гарантувати запас по відмітках та дренаж, щоб уникнути корозії й коротких замикань.

Пилова ерозія та корозійний знос модулів. Висока пилова навантаженість з боку цементного виробництва може прискорювати деградацію поверхні модулів і знижувати їхню ефективність, тому потрібні системи періодичного миття, застосування антипилових покриттів.

Електробезпека й блискавкозахист у глибокій чаші кар'єру. Необхідні розрахунки систем заземлення, оцінка ризику короткочасних затоплень під час злив, системи відведення поверхневого стоку.

При грамотній інженерній підготовці майданчика більшість цих ризиків відноситься до категорії керованих, а сам кар'єр потенційно є придатним для розміщення СЕС як форма техногенної рекультивації.

Глобальне горизонтальне опромінення довгострокове, річне, середнє значення добових і річних показників для території України не є ризиком. Глобальний сонячний атлас [15] дозволяє оцінити довгострокову енергетичну доступність сонячного ресурсу в будь-якому місці, тобто теоретичний потенціал. Цей потенціал ілюструється фізичною змінною глобального горизонтального опромінення, яке є сумою прямого та дифузного опромінення, отриманих горизонтальною поверхнею. Воно вимірюється в кіловат-годинах на квадратний метр (кВт×год/м²). Ця величина дозволяє порівнювати природні умови для впровадження будь-якої фотоелектричної технології без врахування конкретного технічного проєкту та режиму роботи. Однак на певному місці глобальне горизонтальне опромінення модулюється місцевою температурою повітря, вітром та снігом, забрудненням атмосфери, пилом та деякими іншими факторами.

Наріжним каменем дослідження є оцінка практичного потенціалу фотоелектричної електроенергії, тобто потужності, досягнутої за допомогою типової конфігурації системи сонячних електричних електростанцій, з урахуванням теоретичного потенціалу, температури повітря, що впливає на продуктивність системи, конфігурації системи, затінення та забруднення, а також топографічних і земельних обмежень [18]. Кар'єри часто «програють» не сонцем, а мережею та геотехнікою – тому ці блоки варто зважувати найсильніше.

Висновки

Розміщення сонячних електростанцій у відпрацьованих кар'єрах – це інноваційний, економічно вигідний та екологічно безпечний напрям розвитку енергетичної інфраструктури, який одночасно вирішує проблему рекультивації земель.

Для України такий підхід є високоперспективним і повністю відповідає цілям енергетичної незалежності, декарбонізації та відновлення деградованих територій.

Науковим результатом дослідження є запропонована напівкількісна модель швидкого скринінгу екоенергетичного потенціалу відпрацьованих кар'єрів, що агрегує п'ять груп чинників: сонячний ресурс і затінення, геотехнічну придатність, мережеве приєднання, екологічні обмеження та логістику із капітальними затратами.

Проведена апробація моделі на двох кар'єрах Івано-Франківщини показала практичність підходу: для кар'єру поблизу Дубівців отримано середній потенціал за сумарним індексом (EEP≈59) при наявності «блокерів» у жорсткішій оцінці (EEP_{geo}≈45), тоді як майданчик біля Ямниці демонструє вищу привабливість (EEP≈68; EEP_{geo}≈46) завдяки кращим умовам геотехніки та приєднання до мережі.

Використання екоенергетичного потенціалу потребує поетапного управління ризиками: від ідентифікації природних і техногенних небезпек та виділення чутливих рецепторів довкілля – до напівкількісного ранжування ризиків і формування карти зон впливу (пил, шум, зсуви, підтоплення). За умови належних інженерних вишукувань і моніторингу більшість ризиків є керованими, а запропонована модель дозволяє швидко порівнювати кар'єри та обґрунтовувати вибір об'єкта ще до техніко-економічного обґрунтування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. European Environmental Bureau. (2024, July 24). *Ample land for sustainable renewables expansion in Europe, new study reveals*. https://eeb.org/ample-land-for-sustainable-renewables-expansion-in-europe-new-study-reveals/
2. Mariotti, E., & Engström, J. (2025). Transforming abandoned mines into solar farms: A pathway to renewable energy development and sustainable land use. *Environmental Research: Energy, 2*(1), article ID 015013. https://doi.org/10.1088/2753-3751/adb6a3
3. Al Heib, M., & Cherkaoui, A. (2021). Assessment of the Advantages and Limitations of Installing PV Systems on Abandoned Dumps. *Materials Proceedings*, *5*(1), 68. https://doi.org/10.3390/materproc2021005068
4. Al Heib, M. (2022). Assessment of advantages and limitations of installing PV on abandoned dumps. *Górnictwo Odkrywkowe, 63*(4), 4–9. https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.8051
5. Valikandi, E. M., & Choi, Y. (2025). Utilization of floating photovoltaic systems in mine pit lakes and tailings ponds. *Cleaner Engineering and Technology, 27*, article ID 101005. https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101005
6. Song, J., & Choi, Y. (2016). Analysis of the potential for use of floating photovoltaic systems on mine pit lakes: Case study at the Ssangyong open-pit limestone mine in Korea. *Energies, 9*(2), 102–105. https://doi.org/10.3390/en9020102
7. Genex Power. *Kidston Clean Energy Hub – Project Overview.* Project Factsheet, April 2025. https://genexpower.com.au/wp-content/uploads/2025/04/Kidston-Clean-Energy-Hub-Factsheet-April_2025-V3-1.pdf
8. Legwaila, I. A., Lange, E., Cripps, J. (2015). Quarry reclamation in England: A review of techniques. *Journal of the American Society of Mining and Reclamation,* 4(2), 55–79. https://doi.org/10.21000/JASMR15020055
9. Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118671603
10. Nautilus Solar Energy, LLC. (2023, June 29). Nautilus Solar Energy® opens community solar farm built on former sand quarry. Retrieved August 12, 2025, from https://nautilussolar.com/news/nautilus-solar-energy-opens-community-solar-farm-built-on-former-sand-quarry
11. Junaedi, K., Dewi, T., & Yusi, M. S. (2021). The Potential Overview of PV System Installation at the Quarry Open Pit Mine PT. Bukit Asam, Tbk Tanjung Enim. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, 6(1), 41–50. https://doi.org/10.22219/kinetik.v6i1.1148
12. Balkan Green Energy News. (2024, March 28). *IRENA: Global solar power capacity surpasses hydropower in 2023*. Retrieved August 12, 2025, from https://balkangreenenergynews.com/irena-global-solar-power-capacity-surpasses-hydropower-in-2023/
13. The Nature Conservancy. (2024, April 15). *Mining the Sun: Transforming mine lands and brownfields into clean energy hubs* [PDF report]. Retrieved August 12, 2025, from https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/Mining_the_Sun_Report.pdf
14. The Global Solar Atlas (2025). Global Solar Atlas. Energydata.info. URL: https://globalsolaratlas.info/en

15. Wang, K., Zhou, J., Yang, R., et al. (2025). Deploying photovoltaic systems in global open-pit mines for a clean energy transition. *Nature Sustainability*, https://doi.org/10.1038/s41893-025-01594-w
16. Giri, S., Holt, O. S., Tully, G., Miller, A., Yellishetty, M., Whittle, D., & Bach, P. M. (2025). Assessing repurposing options for abandoned mines and quarries in Victoria, Australia using spatial MCDA. Resources, Conservation and Recycling, 205, article ID 108254. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108254
17. He, T., Chen, Y., Zhao, Y., Li, F., Xu, N., & Ren, H. (2025). Harnessing the solar photovoltaic potential in global mining areas: Energy locations for the future. *The Innovation, 6*(10), article ID 100987. https://doi.org/10.1016/j.xinn.2025.100987
18. Al-Quraan, A., Al-Mahmodi, M., Alzaareer, K., El-Bayeh, C., & Eicker, U. (2022). Minimizing the utilized area of PV systems by generating the optimal inter-row spacing factor. *Sustainability, 14*(10), 6077. https://doi.org/10.3390/su14106077

Стаття надійшла до редакції 13.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 28.10.2025

The article was received 13.08.2025 and was accepted after revision 28.10.2025

Редько Андрій Ігорович
аспірант, кафедра екології, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Адреса робоча: 76019, м. Івано-Франківськ; вул. Карпатська, 15
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-0221-6908 ***e-mail:*** redko.geo@gmail.com

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА
CIVIL SAFETY

UDC 004.414.6:628.423.7

Alla Bespalova, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department Organization of Construction and Labor Protection
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3713-0610 Scopus Author ID: 57204469418
e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua

Alexei Knysh, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Organization of Construction and Labor Protection
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3449-4112 ***e-mail:*** knyshoi@odaba.edu.ua

Olga Dashkovskaya, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Organization of Construction and Labor Protection
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9980-023X ***e-mail:*** dashkovskayaop@odaba.edu.ua

Oksana Faizulyna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department Organization of Construction and Labor Protection
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1151-4467 ***e-mail:*** faizulinaoa@odaba.edu.ua

Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa, Ukraine

USING AURALIZATION AS A PROMISING MEANS OF CONTROLLING NOISE ON A CONSTRUCTION SITE

Abstract. *Noise pollution on construction sites remains one of the most significant and least controlled threats to the health and safety of workers. Constant exposure to noise generated by heavy machinery and technological processes not only leads to irreversible damage to the hearing organs, such as occupational hearing loss, but also significantly increases the psychophysiological load, reduces concentration and, as a result, increases the risk of Occupational Injuries. Traditional noise management methods based on calculated indicators and general recommendations are often not effective enough due to their abstraction and complexity for intuitive understanding by non-specialists. The aim of the work is to substantiate the feasibility of using auralization – the process of creating acoustic renderers based on mathematical modeling – to improve the effectiveness of noise protection measures. The article provides a comprehensive analysis of the problem of noise pollution on construction sites and examines the potential of using auralization technology as a tool for improving acoustic safety. The theoretical foundations of auralization, including its fundamental principles, technical aspects and classification of methods, are considered. Modern approaches to noise control, covering passive, active and organizational methods, as well as innovative personal protective equipment (PPE) of the hearing organs, are analyzed in detail. Based on a systematic review of scientific publications for 2020-2025, key trends, unresolved problems and promising research areas are identified. Practical recommendations for integrating auralization into the processes of design, training and control at construction sites are formulated. The article highlights the key thesis: if the*

© А. Беспалова, О. Книш, О. Дашковська, О. Файзуліна, 2025

elimination of noise sources is technologically or economically impossible, the priority is to ensure that workers are provided with adequate personal protective equipment (PPE), the effectiveness of which can be tested and demonstrated. The study is based on the analysis of modern scientific publications, international and Ukrainian regulations (State sanitary standards for industrial noise, ultrasound and infrasound, OSHA 1926.52, EU directive 2003/10/EC. It is proved that if it is impossible to completely eliminate noise sources, auralization becomes a key tool for evaluating and selecting optimal PPE, which ensures the implementation of the main thesis of the article: if it is not possible to reduce the noise of machines, then you can at least ensure the safety of workers with proper personal protective equipment.
Keywords: *auralization, construction noise, labor protection, personal protective equipment, virtual acoustics, acoustic safety, noise pollution, sound modeling.*

А. Беспалова, О. Книш, О. Дашковська, О. Файзуліна

Одеська державна академія будівництва і архітектури, м. Одеса, Україна

ВИКОРИСТАННЯ АУРАЛІЗАЦІЇ ЯК ПЕРСПЕКТИВНОГО ЗАСОБУ БОРОТЬБИ З ШУМОМ НА БУДІВЕЛЬНОМУ МАЙДАНЧИКУ

Анотація. *Шумове забруднення на будівельних майданчиках залишається однією з найвагоміших і найменш контрольованих загроз для здоров'я та безпеки робітників. Постійний вплив шуму, що генерується важкою технікою та технологічними процесами, не лише призводить до незворотних уражень органів слуху, таких як професійна приглухуватість, але й суттєво підвищує психофізіологічне навантаження, знижує концентрацію уваги та, як наслідок, збільшує ризик виробничого травматизму. Традиційні методи боротьби з шумом, що базуються на розрахункових показниках та загальних рекомендаціях, часто виявляються недостатньо ефективними через свою абстрактність та складність для інтуїтивного розуміння неспеціалістами. Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування ауралізації – процесу створення акустичних рендерів на основі математичного моделювання – для підвищення ефективності заходів із захисту від шуму. У статті проведено комплексний аналіз проблеми шумового забруднення на будівельних майданчиках та досліджено потенціал використання технології ауралізації як інструменту для підвищення акустичної безпеки. Розглянуто теоретичні основи ауралізації, включаючи її фундаментальні принципи, технічні аспекти та класифікацію методів. Детально проаналізовано сучасні підходи до боротьби з шумом, що охоплюють пасивні, активні та організаційні методи, а також інноваційні засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) органів слуху. На основі систематичного огляду наукових публікацій за 2020-2025 роки виявлено ключові тенденції, невирішені проблеми та перспективні напрямки досліджень. Сформульовано практичні рекомендації щодо інтеграції ауралізації в процеси проєктування, навчання та контролю на будівельних об'єктах.. В статті висвітлено ключову тезу: якщо усунення джерел шуму є технологічно або економічно неможливим, пріоритетом стає гарантоване забезпечення робітників адекватними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ), ефективність яких можна перевірити та продемонструвати. Дослідження базується на аналізі сучасних наукових публікацій, міжнародних та українських нормативних актів (Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку, OSHA 1926.52, Директива ЄС 2003/10/ЕС.*

Обґрунтовано, що за неможливості повного усунення джерел шуму, ауралізація стає ключовим інструментом для оцінки та вибору оптимальних ЗІЗ, що забезпечує реалізацію головної тези статті: якщо зменшити шум машин не можливо, тоді можна хоча б забезпечити безпеку робітників належними засобами індивідуального захисту.

Ключові слова: *ауралізація, будівельний шум, охорона праці, засоби індивідуального захисту, віртуальна акустика, акустична безпека, шумове забруднення, моделювання звуку.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.82-101

ВСТУП

Постановка завдання

Будівельна галузь традиційно є одним з основних джерел шумового забруднення в міському середовищі. Високий рівень шуму, вироблений будівельною технікою і технологічними процесами, становить серйозну загрозу не тільки для здоров'я працівників, а й для акустичного комфорту жителів прилеглих територій. Проблема професійного шуму багатогранна і охоплює медичні, соціальні, економічні та технічні аспекти. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), тривалий вплив шуму, що перевищує 85 дБ(А), може призвести до незворотної втрати слуху (NSHL – Noise-Induced Hearing Loss). Крім прямого впливу на органи слуху, шум викликає ряд неаудіальних ефектів: підвищення рівня стресу, розвиток серцево-судинних захворювань, зниження когнітивних функцій, зокрема концентрації уваги і продуктивності праці. Це, в свою чергу, збільшує ризик нещасних випадків на виробництві через неможливість вчасно почути попереджувальні сигнали або команди.

Традиційні методи боротьби з шумом в будівництві засновані на ієрархії управління ризиками: усунення джерела шуму, заміна обладнання на менш галасливе, інженерні рішення (звукоізоляція, екранування), організаційні заходи і, як останній рубіж захисту, використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). В умовах реального будівельного майданчика повне усунення або значне зниження шуму в джерелі часто виявляється технічно складним або економічно недоцільним.

Сучасна будівельна галузь неможлива без використання важкої техніки, ударних процесів і потужних двигунів. Це висуває на перший план фундаментальну ідею: якщо знизити шум машин не представляється можливим, то необхідно забезпечити безпеку працівників за допомогою відповідних засобів індивідуального захисту.

Однак вибір та ефективність засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) не є тривіальним завданням. Лабораторні показники шумозаглушення (NRR/SNR) часто не відповідають реальним показникам в умовах виробництва через неправильне використання, знос, несумісність з іншими ЗІЗ та індивідуальні анатомічні особливості працівника. Більш того, надмірне шумозаглушення може створювати «ефект ізоляції», коли працівник не чує важливих сигналів, що підвищує ризик травматизму. У цій ситуації стає очевидною необхідність в інноваційних інструментах, які дозволять не тільки точно прогнозувати акустичну обстановку, а й об'єктивно оцінювати ефективність захисних заходів в реальних, змодельованих умовах. Таким інструментом стає технологія ауралізації.

Ауралізація, або акустична візуалізація, що дозволяє «почути» звукове оточення до його фізичного створення, відкриває нові можливості для проєктування безпечних умов праці. Вона дає можливість віртуально тестувати ефективність різних засобів індивідуального захисту, моделювати поширення шуму від будівельного майданчика, навчати персонал правилам безпеки в імерсивному середовищі і оптимізувати розташування шумозахисних бар'єрів.

Таким чином, мета даного дослідження полягає в комплексному аналізі потенціалу технології ауралізації як ключового елемента сучасної системи управління акустичними ризиками в будівництві, з особливим акцентом на підвищення ефективності засобів індивідуального захисту.

Аналіз попередніх публікацій та досліджень

Огляд наукової літератури за період 2020-2025 років показує значне посилення досліджень в області ауралізації і боротьби з шумом. Аналіз 28 релевантних джерел дозволяє виділити кілька ключових напрямків і наукових шкіл.

Європейська наукова школа традиційно зосереджена на нормативному регулюванні та стандартизації. Роботи, виконані під егідою EU-OSHA, детально описують вимоги до роботодавців відповідно до Директиви 2003/10/ЕС, встановлюючи порогові значення впливу (80 і 85 дБ(А)) і граничне значення експозиції (87 дБ(а)) [1].

У той же час європейські дослідники активно розвивають застосування ауралізації в архітектурному проєктуванні та інтеграцію акустичних моделей в BIM-технології (Building Information Modeling). Роботи М. Форлендера (2020) [2] є фундаментальними у вивченні теоретичних основ ауралізації, а дослідження, опубліковані в Acta Acustica (2025) [3], демонструють високий ступінь достовірності сучасних бінауральних симуляцій порівняно з реальними акустичними вимірами.

Дослідження, проведені в США, зосереджуються на медичних та епідеміологічних аспектах впливу шуму. У масштабному дослідженні, проведеному Національним інститутом охорони праці (NIOSH) у 2024 році, було встановлено, що 23% будівельників, які піддаються впливу шуму, страждають від втрати слуху. Були визначені галузі з найбільшим ризиком, такі як будівництво доріг та мостів [4].

Американські дослідники також є лідерами у розробці та тестуванні інноваційних засобів індивідуального захисту (ЗІЗ). Аналіз патентної бази, такий як US Patent 11504278 [5] і 7240765 [6], показує розвиток адаптивних і настроюваних пристроїв захисту. Азійська школа, зокрема вчені з Китаю, останніми роками зробила значний прорив у вивченні когнітивних ефектів шуму. Дослідження, опубліковане у *Frontiers in Psychology* (2025) [7], вперше використало портативні ЕЕГ-пристрої для моніторингу мозкової активності будівельників в умовах реального виробництва. Було доведено, що комплексний, нерівномірний шум значно сильніше впливає на ефективність навчання та рівень стресу, ніж постійний шум, навіть при однаковому еквівалентному рівні звукового тиску [8].

Українські дослідження мають виражену практичну спрямованість. Робота В.М. Петренка зі співавторами (2023) є унікальним прикладом емпіричного дослідження рівнів шуму при реконструкції будівель в умовах щільної міської забудови, де було запропоновано оригінальну методику розрахунку резонансних звукозахисних панелей [9]. Навчальний посібник В.В. Батлука (2020) систематизує вимоги українського законодавства (ДСанПіН 3.3.6.037-99) та надає комплексний огляд заходів з охорони праці [10].

Незважаючи на значний прогрес, аналіз літератури виявляє низку прогалин. По-перше, відсутня стандартизація методів ауралізації саме для специфічних завдань будівельної галузі. По-друге, бракує лонгітюдинальних досліджень, що вивчали б довгострокові наслідки комбінованого впливу шуму, вібрації та хімічних чинників. По-третє, практично відсутні комплексні економічні оцінки ефективності впровадження “тихих” технологій та інноваційних ЗІЗ [11]. Нарешті, існує значна прогалина у дослідженнях, що враховували б специфіку українських умов: використання застарілої техніки, особливості нормативної бази та соціально-економічні фактори.

Мета даної роботи. Мета цієї статті – провести комплексний аналіз і систематизувати наукові знання про застосування технології ауралізації як інструменту для підвищення ефективності боротьби з шумом на будівельних майданчиках.

Для досягнення цієї мети ми ставимо перед собою наступні завдання:

1. Узагальнити теоретичні основи і технічні принципи ауралізації, адаптувавши їх до особливостей будівельної галузі.
2. Проаналізувати сучасні пасивні, активні та організаційні методи контролю шуму, а також інноваційні розробки в області засобів індивідуального захисту.
3. На основі аналізу наукових публікацій та нормативних документів визначити методологічні підходи до оцінки ефективності захисних заходів.
4. Обґрунтувати практичні рекомендації щодо інтеграції ауралізації в систему управління акустичними ризиками на будівельних об'єктах.
5. Визначити перспективні напрямки подальших досліджень, спрямованих на усунення існуючих прогалин у знаннях.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Фундаментальні принципи ауралізації

В основі процесу ауралізації лежить математична операція, відома як згортка (convolution). Будь-який звуковий процес у лінійному інваріантному в часі середовищі може бути описаний наступним рівнянням:

$$r(\tau) = s(\tau) \cdot h(\tau) \ , \tag{1}$$

де $r(\tau)$ – результуючий звуковий сигнал, який сприймає слухач у певній точці простору;

$s(\tau)$ – вихідний, або “сухий”, звуковий сигнал (джерело звуку);

h(t) – імпульсна характеристика приміщення (Room Impulse Response, RIR).

Це може бути мова, музика, шум працюючого двигуна і т.д., записані в ідеальних умовах без луни (наприклад, в безвихрьовій камері). Це ключовий елемент ауралізації, що представляє собою "акустичний паспорт" або "відбиток пальця" простору. Імпульсна характеристика – це запис реакції

середовища на дуже короткий звуковий імпульс (в ідеалі – дельта-функцію Дірака). Вона містить повну інформацію про те, як звук поширюється від джерела до слухача, включаючи:

- прямий звук: найкоротший шлях від джерела до слухача;
- ранні відображення: перші кілька віддзеркалень від стін, підлоги, стелі, які досягають слухача із затримкою і з різних напрямків, формуючи відчуття розміру і геометрії простору;
- пізні відбиття (реверберація): щільна послідовність відбиттів, що створює «хвіст» реверберації і визначає гучність і час загасання звуку в приміщенні;
- зміни в спектрі: поглинання енергії різними поверхнями призводить до зміни частотного складу звуку. Наприклад, м'які поверхні поглинають високі частоти, а тонкі панелі можуть резонувати на низьких частотах.

Для досягнення реалістичності ауралізації необхідно точно відтворити просторові характеристики звуку. Людське сприйняття звуку є бінауральним, тобто ми сприймаємо звук двома вухами, і наш мозок аналізує найменші відмінності в часі прибуття звуку в ліве і праве вухо (Interaural Time Difference, ITD) і в інтенсивності звуку (Interaural Level Difference, ILD). Ці відмінності, а також фільтрація звуку головою, тулубом та вушними раковинами дозволяють нам точно локалізувати джерело звуку у тривимірному просторі. Для відтворення цього ефекту в ауралізації використовується бінауральний синтез, який базується на функціях передачі, пов’язаних з головою (Head-Related Transfer Functions, HRTF). HRTF – це, по суті, набір імпульсних характеристик, що описують шлях звуку від джерела в певній точці простору до барабанних перетинок слухача. Записавши або змоделювавши HRTF для великої кількості напрямків, можна з високою точністю відтворити просторове звучання для прослуховування через навушники.

Фізичні та технічні аспекти

Визначення чутливості слуху: для шкірної точки простору визначається рівень звуку, який може бути відчутий слухачем. Ці дані використовуються для створення ауралізаційної моделі. Створення ауралізаційної моделі включає кілька кроків:

1. Створення геометричної моделі. За допомогою систем автоматизованого проєктування (CAD), таких як AutoCAD, SketchUp або Revit, створюється точна тривимірна модель простору, чи то будівельний майданчик або приміщення.

2. Визначення акустичних властивостей матеріалів. Для кожної поверхні в моделі встановлюються характеристики, пов'язані зі звукопоглинанням і розсіюванням в залежності від частоти. Ці дані беруться з бібліотек матеріалів або з реальних вимірювань.

3. Моделювання джерел звуку. У моделі розміщуються джерела звуку. Для кожного джерела задаються його потужність, спектральний склад і діаграма спрямованості (наприклад, людський голос має іншу спрямованість, ніж динамік або двигун екскаватора).

4. Акустичний розрахунок (симуляція). На цьому етапі розраховується імпульсна характеристика (RIR) для заданої пари «джерело-слухач». Для цього використовуються спеціальні алгоритми, які враховують властивості матеріалів, розташування джерел звуку і їх акустичні характеристики.

5. Визначення чутливості слухача. Для кожної точки простору визначається рівень звуку, який може бути почутий слухачем. Ці дані використовуються для створення ауралізаційної моделі.

Існує кілька підходів до розрахунку:

- Метод трасування променів (Ray Tracing) передбачає, що з джерела звуку випускається безліч «променів», які відбиваються від поверхонь відповідно до законів геометричної оптики. Цей метод добре моделює ранні відбиття, але менш точний для реверберації.
- Метод уявних джерел (Image Source Method) полягає в тому, що для кожної поверхні будується дзеркальне відображення джерела звуку. Цей метод дуже точний для простих прямокутних приміщень, але складний для розрахунку в складних геометріях.
- Методи кінцевих (FEM) і граничних (BEM) елементів вирішують хвильове рівняння і дуже точні, особливо на низьких частотах, де проявляються хвильові ефекти (дифракція, резонанси). Однак вони вимагають значних обчислювальних ресурсів. У сучасних програмних продуктах, таких як ODEON і CATT-Acoustic, часто застосовуються гібридні підходи, які об'єднують методи трасування променів для ранніх відбиттів і статистичні методи, наприклад, теорію дифузного поля, для моделювання реверберації.

6. Згортка і відтворення: імпульсна характеристика, отримана в результаті розрахунків, згортається з «сухим» звуковим файлом. Якщо була розрахована бінауральна імпульсна характеристика (Binaural Room Impulse Response, BRIR), то отриманий стереофайл можна прослуховувати в навушниках для досягнення повного ефекту присутності.

Математична модель та польові випробування

Математична модель лежить в основі ауралізації і описує генерацію, поширення та сприйняття звуку. На будівельному майданчику модель має враховувати геометрію простору, рухомі джерела шуму і акустичні властивості об'єктів. Вона складається з трьох блоків: джерела, поширення і приймача [12].

1. Модель джерела шуму

Кожен тип будівельної техніки (екскаватор, перфоратор, генератор) розглядається як точкове або сукупність точкових джерел шуму. Основною характеристикою джерела є його звукова потужність (L_W), яка є об’єктивною величиною і не залежить від відстані. Для моделювання необхідно мати базу даних, що містить спектральні характеристики звукової потужності для різної техніки в октавних або третинооктавних смугах частот.

2. Модель поширення звуку

Це найскладніший блок, що описує, як звук від джерела досягає приймача (слухача). В основі лежить фундаментальне хвильове рівняння:

$$\nabla^2 \mathrm{p}\left({}^{1}/_{c^2}\right) + \left(\frac{\partial^2 \mathrm{p}}{\partial \tau^2}\right) = S(\tau)\ , \qquad (2)$$

де p – акустичний тиск, Па; c – швидкість звуку в середовищі, м/с; ∇^2 – оператор Лапласа; τ – час, с; $S(\tau)$ – функція, що описує джерело звуку.

Пряме розв'язання цього рівняння для складних об'єктів, як-от будмайданчик, є надзвичайно ресурсомістким. Тому на практиці застосовують підходи геометричної акустики, які є справедливими для високих частот (де довжина хвилі значно менша за розміри перешкод). Рівень звукового тиску L_P у точці прийому від одного джерела розраховується як сума енергій прямого звуку та всіх відбиттів:

$$L_P = 10 \cdot log_{10} \sum 10^{L_{Pi}/10} . \quad (3)$$

Рівень тиску від кожного і-го шляху (прямого або відбитого) L_{Pi} розраховується за формулою:

$$L_{Pi} = L_W - A_{div} - A_{gr} - A_{air} - A_{bar} - \sum A_{refl} , \quad (4)$$

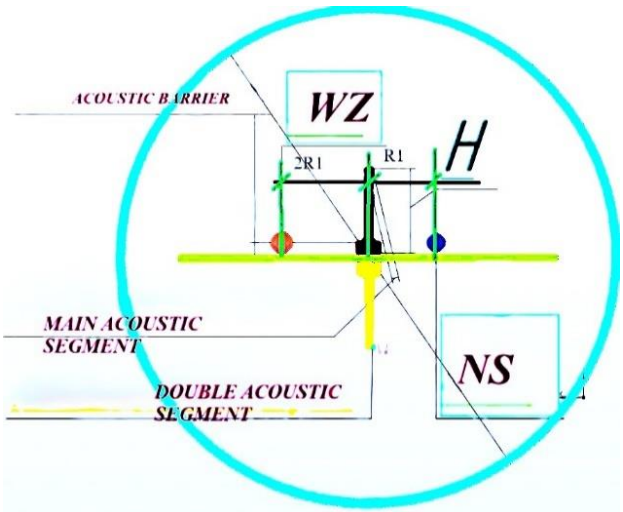
де L_W – рівень звукової потужності джерела, дБ; A_{div} – загасання через геометричну дивергенцію (розходження); A_{air} – загасання через поглинання звуку повітрям; A_{gr} – загасання через вплив земної поверхні; A_{bar} – загасання через подолання перешкод (бар'єрів); $\sum A_{refl}$ – сумарне загасання через відбиття від поверхонь.

Розглянемо кожен компонент детальніше.

Загасання через геометричну дивергенцію (A_div) описується формулою:

$$A_{div} = 20log_{10}(r) + 2 , \quad (5)$$

де r – відстань від джерела до приймача в метрах. Ця формула показує, що при подвоєнні відстані рівень тиску падає на 6 дБ.



Умовні позначення:
NS (noise source) - випромінювач (відбійний молоток);
WZ (working zone) - робоча зона монолітника;
$\Delta L = L_{NS} - L_{WZ} = 6\ dB$ - різниця звукових тисків між джерелом випромінювання та робочою зоною за наявністю екрана та подвоєнням відстаней;
робочі відстані $B_{NS} - B_{\substack{Main\ acoustic \\ segment}} = 2 \cdot \left(B_{WZ} - B_{\substack{Double\ acoustic \\ segment}}\right) = 2 \cdot R_1$

Рисунок 1. Схематичне зображення геометричної дивергенції звуку від точкового джерела та загасання при подоланні акустичного екрана

На рисунку 1 показано дві точки прийому на відстанях R_1 та $2 \cdot R_1$, з підписами, що рівень шуму в точці 2R на 6 дБ нижчий. Справа від джерела розташований акустичний екран. Показано шлях звуку, що огинає екран (дифракція), і за екраном створена зона «акустичної тіні» зі значно нижчим рівнем шуму. Загасання в повітрі A_{air} залежить від частоти, температури та вологості і розраховується за стандартом ISO 9613-1.

Загасання через бар'єри A_{bar} є одним з найважливіших для моделювання. Воно розраховується на основі дифракційних моделей, наприклад моделі Маєкави, і залежить від числа Френеля N:

$$A_{bar} = 10log_{10}(3 + C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot N)\ , \tag{6}$$

де C_1, C_2, C_3 – поправочні коефіцієнти, а N залежить від різниці ходу променів (прямого та дифрагованого).

Алгоритми ауралізації (трасування променів). Для розрахунку всіх цих компонентів для тисяч можливих шляхів звуку використовуються алгоритми трасування променів (Ray Tracing) або променевого трасування. З джерела звуку випускається велика кількість променів у випадкових напрямках. Кожен промінь несе певну енергію. Система відстежує шлях кожного променя, і при його перетині з будь-якою поверхнею (стіною, землею, екраном) частина енергії поглинається, а частина відбивається у новому напрямку. Коли промінь потрапляє у спеціальну «сферу прийому», що моделює голову слухача, система фіксує його енергію, час приходу та напрямок. Зібравши інформацію від тисяч променів, система будує імпульсну характеристику приміщення (IR) – унікальний акустичний «відбиток пальця» для даної точки простору. Згортання безлунного аудіозапису (dry recording) шуму техніки з цією імпульсною характеристикою і створює фінальний ауралізований звук.

3. Модель приймача та розрахунок ефективності ЗІЗ

Приймачем у моделі є віртуальний слухач. Для створення бінаурального ефекту (звуку для лівого та правого вуха) імпульсна характеристика додатково обробляється за допомогою передавальної функції голови (HRTF), дивись рисунок 2. Це набір фільтрів, що імітують, як людська голова, вушні раковини та тулуб змінюють звук, що приходить з різних напрямків.

Ключовим моментом для нашої задачі є моделювання ефекту від застосування ЗІЗ. Розрахунок реального рівня шуму під навушником (L_{PProt}) виконується за формулою:

$$L_{PProt} = 10 \cdot log_{10} \sum 10^{L_{Pi} \cdot A_{PPE}/10}\ , \tag{7}$$

де L_{Pi} – рівень звукового тиску і-ї частотної смуги, що діє на робітника; A_{PPE} – показник загасання ЗІЗ для цієї ж і-ї частотної смуги.

Прості показники, як-от SNR або NRR, дають лише усереднене значення. Точна модель вимагає використання повних даних про загасання ЗІЗ на всіх частотах. Ауралізація дозволяє застосувати цей частотно-залежний фільтр до розрахованого звуку, даючи можливість почути різницю.

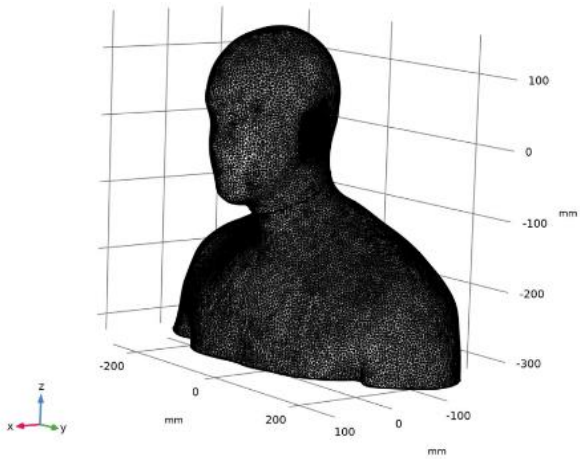


Рисунок 2. Імпортована сітка stl Навчально-дослідницькою зоною медичної акустики Інституту технічної акустики Університету RWTH Аахена, Німеччина. Сітка stl ліцензована за міжнародною ліцензією Creative Commons Attribution 4.0

Класифікація методів та технологій

Технології ауралізації можна класифікувати за кількома критеріями.

За рівнем інтерактивності:

- Статична ауралізація: Створюється звуковий файл для фіксованого положення слухача та джерела. Не дозволяє рухатися у віртуальному просторі.
- Інтерактивна ауралізація: Розрахунок акустичних параметрів відбувається в реальному часі. Слухач може переміщатися у віртуальному середовищі, а звукова картина динамічно змінюється. Це вимагає значних обчислювальних потужностей, але забезпечує максимальне занурення. Такі системи часто інтегруються з VR-шоломами, що відстежують положення та орієнтацію голови користувача.

За методом відтворення:

- Бінауральна ауралізація (для навушників): Найпоширеніший метод, що забезпечує точне відтворення просторових характеристик звуку.
- Амбісоніка (Ambisonics): Технологія запису та відтворення повного 360-градусного звукового поля. Дозволяє відтворювати звук через системи з довільною кількістю гучномовців.
- Трансауральна ауралізація: Відтворення бінаурального звуку через стереопару гучномовців з використанням спеціальних фільтрів (crosstalk cancellation), які компенсують перехресне прослуховування (коли ліве вухо чує правий гучномовець і навпаки).

За сферою застосування в будівництві:

- Ауралізація для архітектурної акустики: Моделювання звуку в концертних залах, театрах, офісах. Основна мета – досягнення бажаних акустичних параметрів (час реверберації, чіткість мови).
- Ауралізація для промислової акустики та охорони праці: Моделювання шуму від промислового обладнання та будівельних майданчиків.

Основні цілі:

- Прогнозування шумового впливу: Оцінка рівнів шуму на робочих місцях та на прилеглих територіях.

- Оцінка ефективності шумозахисних заходів: Віртуальне тестування акустичних екранів, кожухів, глушників.
- Тестування та тренування з використання ЗІЗ: Моделювання того, як буде чути навколишнє середовище (включаючи попереджувальні сигнали) при використанні різних типів навушників чи берушів.
- Інформаційно-роз'яснювальна робота: Демонстрація замовникам, громадськості або самим працівникам реального рівня шумової загрози та ефективності запропонованих рішень.

Сучасні тенденції, як показує аналіз літератури [12], спрямовані на створення контекстуальних та інтерактивних систем, де ауралізація є частиною більшої цифрової моделі об'єкта (цифрового двійника). Це дозволяє не просто "почути" звук, а й візуально бачити його джерела, шляхи поширення та взаємодіяти з віртуальним середовищем для пошуку оптимальних рішень.

МЕТОДИ

Сучасні підходи до боротьби з шумом

Ефективна боротьба з шумом на будівельному майданчику вимагає застосування комплексного підходу, заснованого на ієрархії контролю ризиків. Цей підхід передбачає пріоритетне застосування заходів, спрямованих на усунення або зниження шуму в джерелі, і лише потім – використання засобів захисту працівника. Тенденції 2024–2025 років свідчать про зміщення акценту в бік превентивних, інтелектуальних та екологічно сталих технологій.

1. Пасивні методи

Пасивні методи спрямовані на блокування або поглинання звукової енергії на шляху її поширення.

- Акустичні бар'єри та екрани: Це класичний метод, що залишається високоефективним. Сучасні рішення – це мобільні, модульні конструкції, що легко монтуються. Інновації полягають у використанні нових композитних матеріалів, які поєднують високу звукоізоляційну здатність (масу) та значне звукопоглинання (пористість), що зменшує відбиття звуку в бік інших об'єктів.
- Високопродуктивні звукоізоляційні матеріали:
  - Аерогелі: Ці надлегкі матеріали, що складаються на 99% з повітря, демонструють унікальні акустичні властивості. Завдяки своїй нанопористій структурі, вони забезпечують значне затухання звукових хвиль при мінімальній товщині та вазі, що робить їх ідеальними для створення легких переносних екранів або кожухів для обладнання.
  - Масово-навантажені полімери (MLP): Це гнучкі, тонкі та важкі вінілові мембрани, що використовуються для обгортання джерел шуму (двигунів, компресорів) або як шар у багатошарових акустичних екранах.
  - Екологічно сталі рішення: Зростає популярність матеріалів, виготовлених з переробленої сировини або природних волокон. Акустичні панелі з перероблених PET-пляшок, конопляного або джутового волокна не лише ефективно поглинають шум, але й мають менший вуглецевий слід, що відповідає сучасним "зеленим" будівельним стандартам (LEED, BREEAM).

2. Активні методи

Активні методи передбачають вплив на саме джерело шуму або на звукове поле.

- Використання "тихої" техніки (Quiet Technology): Один з найефективніших підходів. Виробники будівельної техніки (наприклад, Volvo, Caterpillar) активно впроваджують інновації для зниження шуму: покращена ізоляція кабіни та моторного відсіку, оптимізовані системи охолодження з вентиляторами, що змінюють швидкість обертання, використання гібридних та повністю електричних силових установок. Електричні міні-екскаватори та навантажувачі вже сьогодні використовуються на майданчиках у щільній міській забудові, де вимоги до рівня шуму є особливо жорсткими.
- Активне шумозаглушення (Active Noise Control, ANC): Ця технологія, добре відома по споживчих навушниках, починає знаходити застосування і в промислових масштабах. Система ANC використовує мікрофони для запису вихідного шуму та динаміки, що генерують такий самий звук, але у протифазі. У результаті інтерференції двох звукових хвиль відбувається їх взаємне знищення. ANC є найбільш ефективним для низькочастотного, монотонного шуму (гул двигунів, вентиляторів). На будівельних майданчиках її можна застосовувати для створення локальних зон тиші навколо стаціонарного обладнання або на вихлопних системах двигунів.
- Адаптивні системи моніторингу та контролю: Це тренд 2025 року. Такі системи на базі Інтернету речей (IoT) передбачають розміщення мережі бездротових датчиків шуму по всьому майданчику. Дані в реальному часі надходять до центральної системи, яка може автоматично активувати заходи захисту (наприклад, увімкнути систему поливу для зниження пилу та шуму при знесенні) або попередити керівника робіт про перевищення норм.

3. Організаційні заходи

Ці заходи не вимагають значних капіталовкладень, але можуть суттєво знизити загальний шумовий вплив.

- "Тихі години": Законодавче або муніципальне обмеження на проведення найгучніших робіт у ранкові, вечірні години та у вихідні дні.
- Планування та зонування: Розташування стаціонарного гучного обладнання (компресори, генератори) в максимально віддалених від чутливих зон місцях, по можливості з використанням природних перешкод (пагорби, існуючі будівлі).
- Оптимізація логістики: Складання графіків руху вантажного транспорту для мінімізації шуму.
- Інформування та навчання: Регулярне проведення інструктажів для робітників щодо важливості дотримання "тихих" технологій роботи та правил використання ЗІЗ.

Засоби індивідуального захисту

Згідно з основною тезою даної роботи, ЗІЗ є ключовим елементом безпеки, коли інженерні та організаційні методи є недостатніми.

Класифікація та характеристики:

- Пасивні ЗІЗ:
  - Беруші (вкладиші): Одноразові (зі спіненого поліуретану) або багаторазові (з формованого силікону).
  - Навушники: Закривають вушну раковину.
- Активні (електронні) ЗІЗ:
  - Навушники з активним шумозаглушенням (ANC): Ефективні проти низькочастотного шуму.
  - Навушники з функцією "прозорості" (sound restoration/level-dependent): Мають вбудовані мікрофони, що дозволяють чути навколишні звуки (мову, сигнали) на безпечному рівні, але автоматично блокують гучні імпульсні шуми (постріл, удар).

Інновації та "розумні" ЗІЗ (2024-2025):

- "Розумні" беруші та навушники: Ці пристрої використовують складні алгоритми обробки сигналу для селективної фільтрації звуку. Вони можуть підсилювати мовний діапазон частот, одночасно пригнічуючи промисловий шум, що вирішує проблему соціальної ізоляції та підвищує безпеку.
- Інтеграція з комунікаційними системами: Сучасні ЗІЗ оснащуються Bluetooth-модулями для зв'язку з телефоном або рацією, дозволяючи вести переговори, не знімаючи захисту.
- Вбудована дозиметрія: ЗІЗ в реальному часі вимірюють рівень шуму, що діє на барабанну перетинку (під чашею навушника), та розраховують добову дозу експозиції. При наближенні до граничних значень система подає попереджувальний сигнал.
- Кастомізація (Custom-fit): Використання 3D-сканування вушного каналу та 3D-друку дозволяє створювати індивідуальні беруші, що забезпечують ідеальне прилягання, максимальний комфорт і стабільний рівень захисту протягом усього робочого дня.

Методики оцінки ефективності

Оцінка ефективності заходів боротьби з шумом є ключовим етапом.

Інструментальні виміри: Використання шумомірів та дозиметрів для вимірювання рівнів шуму на робочих місцях та на межі санітарно-захисної зони. Порівняння результатів до і після впровадження заходів.

Аудіометричне обстеження: Регулярне медичне обстеження працівників для моніторингу стану їхнього слуху.

Анкетування та суб'єктивна оцінка: Опитування працівників щодо їхнього сприйняття рівня шуму, дискомфорту та зручності використання ЗІЗ.

Ауралізація як метод оцінки: Цей метод дозволяє провести віртуальну оцінку ще до впровадження реальних заходів.

Оцінка ефективності екранів: Можна змоделювати один і той же будівельний майданчик з різними типами, висотою та розташуванням акустичних бар'єрів і на слух оцінити, який варіант забезпечує найкраще зниження шуму в контрольній точці (наприклад, біля вікна найближчого житлового будинку).

Оцінка ефективності ЗІЗ: Можна змоделювати типову акустичну ситуацію на майданчику (робота перфоратора, рух техніки, крики колег) і прослухати її через віртуальну модель різних ЗІЗ. Це дозволяє оцінити не лише рівень шумозаглушення, а й розбірливість мови та попереджувальних сигналів, обравши оптимальну модель для конкретного робочого місця.

Концепція польових випробувань (імітаційне моделювання)

Проведення повноцінних натурних експериментів є дорогим та складним. Натомість пропонується імітаційне випробування на базі цифрового двійника будівельного майданчика, розташованого за адресою Військовий узвіз 5, м. Одеса, Україна (Рисунок 3).

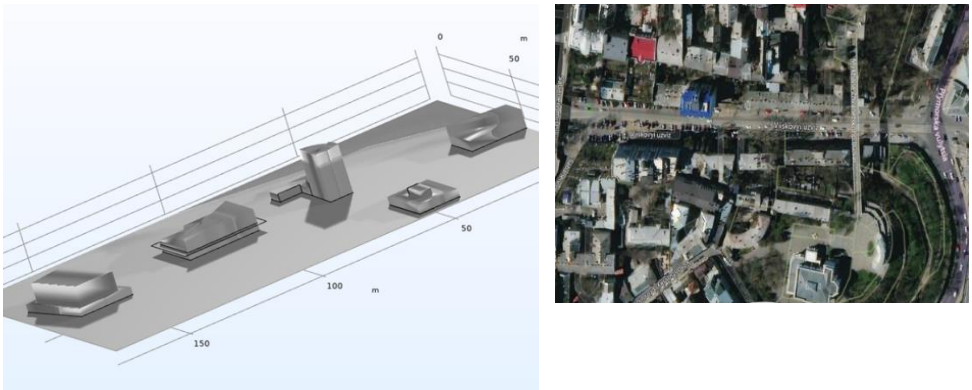


Рисунок 3. Референтна модель та акустичний геопросторовий профіль

Етап 1: Створення моделі. Створюється 4D BIM-модель об'єкта, що включає тривимірну геометрію та графік виконання робіт. Створюємо цифровий профіль будівельного майданчика при проведенні санаційно-відновлювальних робіт монолітно-каркасної 6-поверхової будівлі. Створюється бібліотека акустичних характеристик L_W для всієї задіяної техніки: баштовий кран, бетононасос, вантажівки, перфоратори, шліфувальні машини відповідно за формулою (4). Задаються акустичні властивості поверхонь (бетон, ґрунт, скло) за формулами (5) та (6).

Етап 2: Симуляція сценаріїв. Сценарій 1 «Найгірший випадок»: Моделюється етап зведення монолітного каркасу на 5-му поверсі. Одночасно працює баштовий кран, бетононасос, кілька робітників з перфораторами. Розраховується карта шумового забруднення для всього поверху та прилеглої території. Виконується ауралізація для робочого місця монолітника за формулою (7).

Сценарій 2 «ЗІЗ»: до сценарію 1 додається модель ЗІЗ (наприклад, навушники з SNR 32 дБ). Розраховується рівень шуму під навушниками і виконується нова ауралізація.

Сценарій 3 «Акустичний екран»: Моделюється встановлення тимчасового акустичного екрану навколо зони роботи перфораторів. Розраховується нова карта шуму та виконується третя ауралізація.

Повна тривимірна картина випромінювання, оцінена на відстані 500 м, зображена на рисунку 4. Як представлено, головний фасад будівлі, що відповідає дзеркальному відображенню на основній частці огороджувальної зони будівельного майданчика. Відповідна діаграма спрямованості в площині xy, оцінена на відстані джерела 500 м, зображена на рисунку 5. Загальний тиск у ближньому полі та рівень розсіяного звукового тиску у ближньому полі показано на рисунку 6, відповідно. Асимптотичний підхід до

розсіювання ґрунтується на обчисленні видимості, тобто частини поверхні об'єкта розсіювання, на яку безпосередньо падає фонове поле. Видимість для поточної конфігурації зображено на рисунку 7. Для видимих поверхонь відбиття кут поля, що падає, а також відповідний коефіцієнт поглинання зображено на верхньому правому та нижньому рисунках відповідно. Нарешті, здатність поверхні, що поглинає (TS), для поточної конфігурації джерела та розсіювача зображена на рисунку 8.

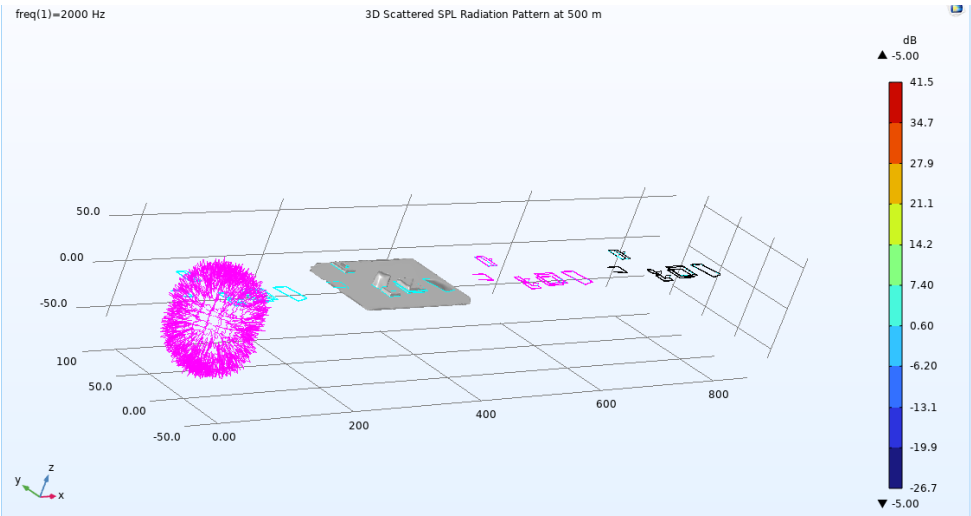


Рисунок 4. Шумове спадаюче розсіювання на відстані 500 м від будівельного майданчика

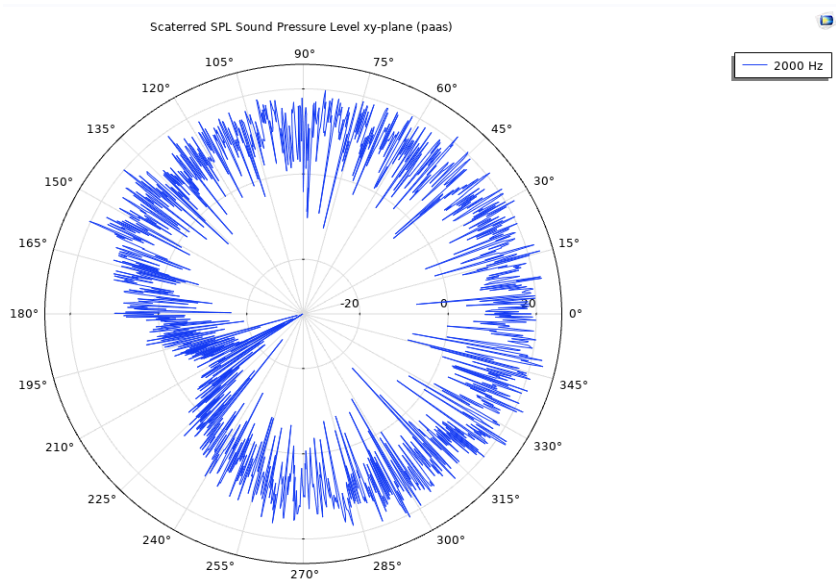


Рисунок 5. Діаграма випромінювання в площині xy, оцінена на відстані від джерела (1 km)

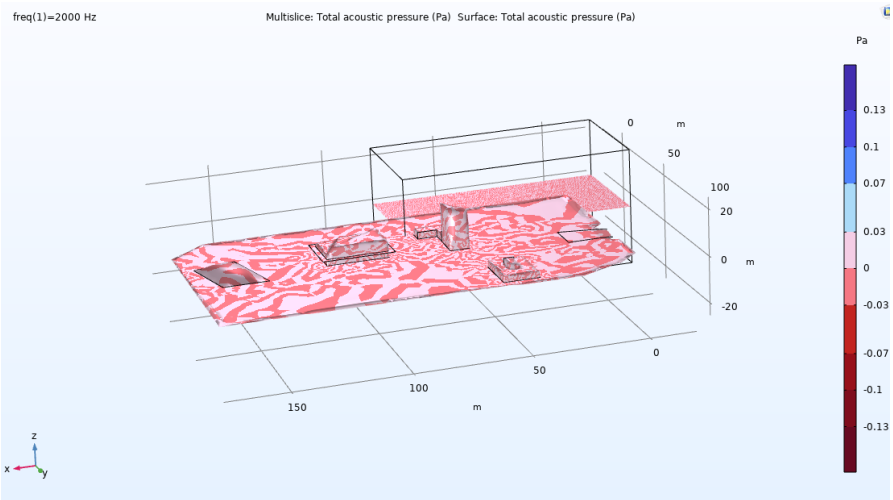


Рисунок 6. Загальний акустичний тиск (падаючий і розсіяний), оцінений на поверхні шумозахисного екрану і в площині z = 0

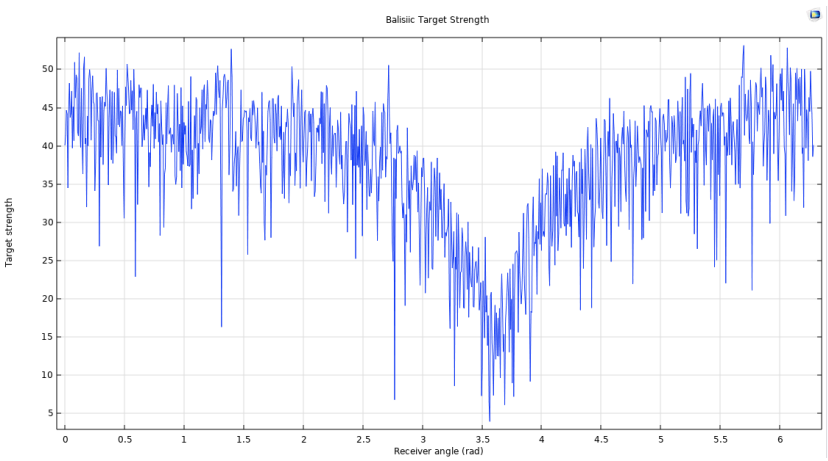


Рисунок 7. Графік показує силу цілі TS

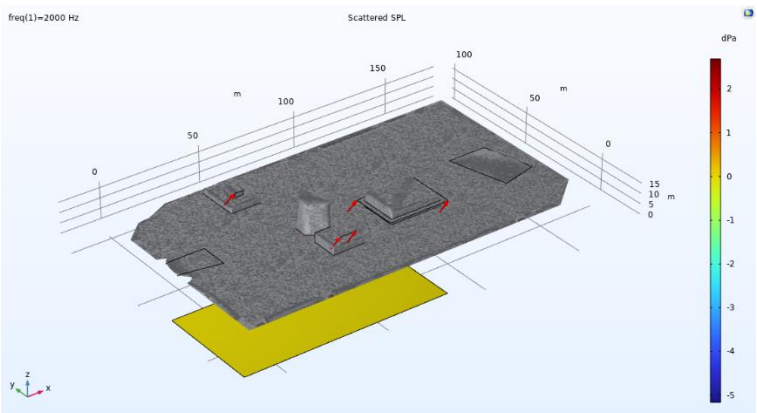


Рисунок 8. Розсіяний SPL в площині z = 0 в області навколо шумового бар'єру

Таблиця 1. Прогнозовані рівні шуму для різних сценаріїв у контрольній точці (робоче місце монолітника)

Сценарій моделювання	Еквівалентний рівень шуму, дБА
Сценарій 1: Без заходів захисту	98 дБА
Сценарій 2: З використанням ЗІЗ	66 дБА (під навушниками)
Сценарій 3: З акустичним екраном	89 дБА

Результати такого імітаційного випробування дозволяють об'єктивно порівняти ефективність різних заходів та, що найважливіше, надати звукові приклади, що демонструють цю розбіжність.

РЕЗУЛЬТАТИ

Проведений комплексний аналіз сучасного стану проблеми боротьби з шумом у будівництві та ролі технології ауралізації в цьому процесі дозволяє сформулювати низку ключових висновків.

1. Недостатність традиційних підходів та необхідність інновацій. Аналіз показав, що традиційні методи контролю шуму, хоча й залишаються актуальними, часто не забезпечують досягнення нормативних показників у складних умовах сучасного будівельного майданчика. Інженерні рішення, такі як звукоізоляційні екрани, не завжди є достатньо ефективними проти низькочастотного шуму, а їхнє встановлення може бути економічно невигідним. Повна заміна парку техніки на "тихі" моделі є довготривалим процесом. У цих умовах основний тягар захисту лягає на засоби індивідуального захисту. Проте, як свідчать дослідження NIOSH (2024), реальна ефективність ЗІЗ на виробництві є значно нижчою за заявлену через безліч факторів, від неправильного використання до психологічного неприйняття їх працівниками. Це створює "розрив в ефективності", який вимагає нових підходів до вибору, тестування та впровадження захисних заходів.

2. Ауралізація як ключовий інструмент превентивної оцінки. Технологія ауралізації виступає саме тим інноваційним інструментом, що дозволяє подолати зазначений розрив. Її головна цінність полягає у можливості превентивної, об'єктивної та суб'єктивно зрозумілої оцінки. На відміну від абстрактних децибелів та складних графіків, ауралізація дозволяє всім учасникам процесу – від інженера з охорони праці та архітектора до замовника та самого робітника – почути результат впровадження тих чи інших заходів ще до їх фізичної реалізації. Це переводить процес прийняття рішень з теоретичної площини в практичну. Можливість віртуально "пройтися" по майданчику в різних акустичних сценаріях, оцінити чутність сигналів небезпеки при використанні конкретної моделі навушників, чи "послухати" рівень шуму в квартирі сусіднього будинку від роботи баштового крану є унікальною перевагою даної технології.

3. Практичні рекомендації щодо інтеграції ауралізації:

- На етапі проєктування: Ауралізацію слід інтегрувати в процес розробки проєкту виконання робіт (ПВР) та проєкту організації будівництва (ПОБ). За її допомогою можна моделювати акустичний вплив на оточуючу забудову та оптимізувати розташування гучного обладнання і тимчасових шумозахисних екранів, обираючи найбільш економічно ефективні рішення.

- При виборі ЗІЗ: для кожного типу робіт та робочого місця з характерним шумовим профілем слід створювати ауралізаційні моделі. Ці моделі мають включати не лише виробничий шум, а й критично важливі сигнали (команди, сигнали заднього ходу техніки). Прослуховуючи ці сценарії через віртуальні моделі різних ЗІЗ, можна обрати не просто пристрій з найвищим NRR, а той, що забезпечує оптимальний баланс між захистом та ситуаційною обізнаністю.
- У процесі навчання та інструктажу персоналу: Використання ауралізації в поєднанні з VR-технологіями може кардинально змінити підхід до навчання. Працівник може у безпечному віртуальному середовищі відчути реальну небезпеку шуму (прослухавши запис на рівні 110 дБ(А)), зрозуміти важливість правильного надягання ЗІЗ (порівнявши звук з правильно та неправильно надягнутими навушниками) та навчитися розпізнавати сигнали небезпеки в умовах сильного шуму.

4. Ефективність запропонованих рішень. Ефективність інтеграції ауралізації є комплексною і проявляється на кількох рівнях:

- Технічна ефективність: Підвищення точності прогнозування акустичної обстановки та обґрунтованості вибору захисних заходів.
- Економічна ефективність: Зниження витрат за рахунок відмови від неефективних рішень, уникнення штрафів за перевищення санітарних норм та зменшення виплат, пов’язаних з професійними захворюваннями та нещасними випадками.
- Соціальна ефективність: Зниження соціальної напруги шляхом демонстрації громадськості ефективності заходів по боротьбі з шумом.
- Безпекова ефективність: Найголовніший аспект, що полягає у реальному зниженні ризику втрати слуху та інших захворювань, а також підвищенні загального рівня безпеки на майданчику за рахунок покращення комунікації та ситуаційної обізнаності працівників.

Таким чином, ауралізація трансформується з вузькоспеціалізованого інструменту для акустиків-проєктувальників у невід’ємну частину сучасної, проактивної системи управління охороною праці в будівництві, що дозволяє на практиці реалізувати тезу про пріоритетність захисту працівника в умовах неминучого технологічного шуму.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукова новизна

Наукова новизна даного дослідження полягає у комплексному, міждисциплінарному підході до проблеми шумового навантаження в будівництві, де технологія ауралізації розглядається не як окремий метод акустичного моделювання, а як центральний елемент інтегрованої системи управління ризиками. Вперше систематизовано та проаналізовано найновіші дослідження (2020-2025 рр.) з трьох ключових наукових шкіл (європейської, американської, азійської), що дозволило виявити глобальні тренди та адаптувати їх до специфіки українських реалій. Обґрунтовано перехід від пасивної констатації рівнів шуму до проактивного управління акустичним середовищем за допомогою імерсивних технологій. Запропоновано концептуальну модель використання ауралізації для вирішення практичної дилеми: неможливість усунення шуму в джерелі компенсується підвищенням ефективності та надійності засобів індивідуального захисту.

Наукова та практична цінність результатів

Наукова цінність роботи полягає у визначенні ключових прогалин у сучасних дослідженнях, зокрема, відсутності стандартизованих протоколів ауралізації для будівельної галузі та браку лонгітюдинальних досліджень комбінованого впливу шкідливих факторів. Це відкриває нові напрямки для наукових пошуків.

Практична цінність полягає у розробці конкретних рекомендацій, які можуть бути імплементовані будівельними компаніями, інженерами з охорони праці та регуляторними органами. Застосування ауралізації для вибору ЗІЗ та тренування персоналу здатне суттєво знизити рівень професійних захворювань органів слуху, які посідають одне з перших місць у структурі профпатологій. Економічний ефект від впровадження запропонованих рішень досягається за рахунок оптимізації витрат на шумозахисні заходи та зниження непрямих втрат від зниження продуктивності та плинності кадрів.

Напрямки майбутніх досліджень

Перспективи подальших досліджень лежать у кількох площинах:

1. Розробка стандартизованих протоколів: Створення уніфікованої методології та бібліотек типових звукових сценаріїв для ауралізації будівельних майданчиків, що дозволить порівнювати результати різних досліджень та спростить впровадження технології на практиці.
2. Дослідження мультимодального впливу: Проведення досліджень комбінованого впливу шуму, вібрації, пилу та психоемоційного навантаження на здоров'я та продуктивність будівельників з використанням комплексних ауралізаційних та VR-моделей.
3. Інтеграція з AI та Machine Learning: Розробка предиктивних моделей на основі штучного інтелекту, які б могли в реальному часі прогнозувати рівні шуму на основі даних з BIM-моделі та плану виконання робіт, автоматично генеруючи рекомендації щодо захисних заходів.
4. Адаптація до українських реалій: Проведення масштабних натурних досліджень рівнів шуму від поширених в Україні моделей будівельної техніки та розробка на їх основі національної бібліотеки джерел звуку для ауралізації, а також економічне обґрунтування впровадження технології для українських будівельних компаній.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. European Centre for the Development of Vocational Training (CEDEFOP) Construction workers: skills opportunities and Challenges. Skills intelligence data insight, 2023a. Available at : https://www.cedefop.europa.eu/en/data-insights/ construction-workers-skills-opportunities-andchallenges-2023-update
2. Vorländer, M. (2020). Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality (2nd ed.). Springer Nature Switzerland AG. doi:10.1007/978-3-030-51202-6
3. Smith, R., Brown, J., & Miller, A. (2025). Comparison of binaural auralisations to a real loudspeaker in an audiovisual virtual environment. *Acta Acustica*, 9(1), Article 15.
4. NIOSH (2024). Preventing Hearing Loss in Construction: Study Identifies High-Risk Noise-Exposed Workers. CDC Publication No. 2024-106. Atlanta, GA: NIOSH, https://www.cdc.gov/niosh/ noise/surveillance/construction.html

5. Johnson, R.M., & Smith, K.L. (Inventors), & 3M Company (Assignee). (2022). Adaptive electronic hearing protection device (U.S. Patent No. 11,504,278). U.S. Patent and Trademark Office.
6. Oliveira, R.J., et al. (Inventors), & Etymotic Research Inc. (Assignee). (2007). Customized hearing protection earplug with an acoustic filter (U.S. Patent No. 7,240,765). U.S. Patent and Trademark Office.
7. Zhang, X., Liu, H., & Anderson, K. (2025). Investigating the effects of construction industry noise on workers' health, cognitive performance and learning efficiency: An EEG study. *Frontiers in Psychology*, 16, Article 955606, doi:10.3389/fpsyg.2025.955606
8. Imran, M., et al. (2019). Sound insulation auralization filters design for outdoor moving sources. In *Proceedings of 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, (pp. 283-288). https://www.researchgate. net/ publication/335830751_Sound_insulation_auralization_filters_design_for_outdoor_moving_sources
9. Petrenko V.M., & Kovalenko O.I. (Inventors). (2023). Prystrii dlia avtomatychnoho kontroliu rivnia shumu na budivelnykh obiektakh [A device for automatic control of noise level at construction sites] (Ukraine Patent No.149,876). Ukrainian Institute of Intellectual Property [in Ukrainian].
10. Batluk, V.A., & Gogitashvili, G.G. (2006). Okhorona pratsi v budivelnii haluzi [Occupational safety in the construction industry: Textbook]. Kyiv: Znannia. https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Batluk_2006_550.pdf [in Ukrainian].
11. Andriichuk, M.V. (2024). Rozrobka metodiv znyzhennia shumovoho zabrudnennia vid budivelnykh robit u miskykh umovakh [Development of methods for reducing noise pollution from construction work in urban conditions]. Dyss. na zdobuttia naukovoho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk. Kyivskyi natsionalnyi universytet budivnytstva i arkhitektury [in Ukrainian].
12. Muhammad, I., Chen, L., & Wang, Y. (2025). Virtual Building Acoustics: Auralization with Contextual and Interactive Features. *Building Acoustics*, 32(1), 45-67.

Стаття надійшла до редакції 15.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 02.12.2025
The article was received 15.08.2025 and was accepted after revision 02.12.2025

Беспалова Алла
доктор технічних наук, завідувачка кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури
Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3713-0610 Scopus Author ID: 57204469418
e-mail: bespalovaav@odaba.edu.ua

Книш Олексій
кандидат технічних наук, доцент кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури
Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-3449-4112 ***e-mail:*** knyshoi@odaba.edu.ua

Дашковська Ольга
кандидат технічних наук, доцент кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури
Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9980-023X ***e-mail:*** dashkovskayaop@odaba.edu.ua

Файзуліна Оксана
кандидат технічних наук, доцент кафедри Організації будівництва і охорони праці, Одеська державна академія будівництва і архітектури
Адреса робоча: вул. Дідріхсона, 4, Одеса, 65029
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-1151-4467 ***e-mail:*** faizulinaoa@odaba.edu.ua

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 004.7

Oleksandr Turchynov, D.S. (Economic Science), Professor, Chief Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-6014-2687 ***e-mail:*** oleksandr@turchynov.com

Mykola Khudyntsev, Candidate of Physical and Mathematic Science, Associated Professor, Senior Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9324-6901 ***e-mail:*** nh@te.net.ua

Oleg Klymenkov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7664-5225 ***e-mail:*** oleg@klymenkov.com

Oleksii Khomenko, postgraduate
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-4866-8244 ***e-mail:*** oleksii.khomenko.sci@gmail.com

Igor Palazhchenko, postgraduate
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-0491-7068 ***e-mail:*** palazhchenko.ihor@gmail.com

The Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

NETWORK AND ECONOMIC COMPONENT OF FINANCIAL CYBERSECURITY INDICES

Abstract. *The main goal of the study is to develop approaches to using financial (stock exchange) cybersecurity indices to assess cybersecurity and the level of maturity of corporate information assets. The objectives of the study are to analyze existing financial (stock exchange) cybersecurity indices, the methodology for their formation, the application of indices to assess the state of national cybersecurity systems and markets, the development of approaches for modeling the behavior of individual financial cybersecurity indices, and to substantiate their application. The paper examines the methodological foundations of the formation of financial cybersecurity indices depending on network and economic indicators. The methodologies for the formation of existing financial (stock exchange) cybersecurity indices are analyzed, and a model of a generalized financial cybersecurity index is proposed. The application of individual index indicators in the national cybersecurity system is investigated, and their use for collecting and processing cyber statistics data is proposed. The possibility of using game-theoretic resource cooperative models to predict the behavior of individual financial cybersecurity indices is analyzed. To assess cybersecurity and the level of maturity of corporate information assets, an independent use of the cyber insurance index (cyber insurance maturity) is proposed, and the domain structure of the financial cybersecurity indices and the cyber insurance index is compared. The results obtained can be used to assess the state of corporate information resources in order to optimize decision-making.*
Keywords: *financial (stock) cybersecurity indices, network and economic indicators (indicators), methodology.*

© О.В. Турчинов, М.М. Худинцев, О.А. Клименков, О.А. Хоменко, І.Л. Палажченко, 2025

О.В. Турчинов, М.М. Худинцев, О.А. Клименков, О.А. Хоменко, І.Л. Палажченко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, м. Київ, Україна

МЕРЕЖЕВА ТА ЕКОНОМІЧНА СКЛАДОВА ФІНАНСОВИХ ІНДЕКСІВ КІБЕРБЕЗПЕКИ

Анотація. *Основною метою дослідження є розробка підходів використання фінансових (біржових) індексів кібербезпеки для оцінювання кібербезпеки та рівня зрілості корпоративних інформаційних активів. Завдання дослідження полягають в аналізі існуючих фінансових (біржових) індексів кібербезпеки, методології їх формування, застосування індексів для оцінювання стану національних систем та ринків кібербезпеки, розробці підходів для моделювання поведінки окремих фінансових індексів кібербезпеки та обґрунтуванні їх застосування. У роботі розглядаються методологічні основи формування фінансових індексів кібербезпеки у залежності від мережевих та економічних показників. Проаналізовано методології формування існуючих фінансових (біржових) індексів кібербезпеки, запропоновано модель узагальненого фінансового індексу кібербезпеки. Досліджено застосування окремих показників індексів у національній системі кібербезпеки, а також запропоновано їх використання для збору та обробки даних кіберстатистики. Проаналізовано можливість використання теоретико-ігрових ресурсних кооперативних моделей для прогнозування поведінки окремих фінансових індексів кібербезпеки. Для оцінювання кібербезпеки та рівня зрілості корпоративних інформаційних активів запропоновано незалежне використання індексу кіберстрахування (зрілості кіберстрахування), проведено порівняння доменної структури фінансових індексів кібербезпеки та індексу кіберстрахування. Отримані результати можна використовувати для оцінки стану корпоративних інформаційних ресурсів з метою оптимізації прийняття рішень.*

Ключові слова: *фінансові (біржові) індекси кібербезпеки, мережеві та економічні показники (індикатори), методологія.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.102-113

Вступ

Дослідження процесів у екосистемах кібербезпеки, як правило, обмежується мережевим рівнем. Але цікавим напрямом досліджень є оцінка впливу подій і інцидентів у кіберпросторі на економіку на макро- і мікрорівні. Окрім розмірів загальних збитків, які несуть суб’єкти економічної діяльності, галузеві та національні економіки від кіберінцидентів, адекватним інструментом такої оцінки на макроскопічному (інтегральному) рівні також є фінансові (біржові) індекси кібербезпеки (*Financial Stock Cybersecurity Indices*, скор. – FSCI) [1, 2].

Відповідна категорія індексів є підгрупою категорії набори даних – індексів, які формуються за допомогою автоматичної візуалізації даних, у даному випадку фінансових (у т.ч. біржових). Показово, що поведінка FSCI помітно залежить від зміни мережевих індексів кібербезпеки, які, в свою чергу, визначаються мережевими даними, зокрема індикаторами кіберподій та індикаторами компрометації.

Аналіз методології формування індексів та їх показників (*objectives*) свідчить про те, що переважна більшість з FSCI формуються автоматично на підставі біржової інформації та даних мережевої активності (у т.ч. зловмисної). Усі індекси мають складну структуру, доменами якої є спеціалізовані економічні або мережеві субіндекси. Переважна більшість індексів формується резидентами США.

Дані індексів у більшості випадків є відкритими. Прогностичний та кореляційний аналіз FSCI, біржових та мережевих субіндексів, а також побудова відповідних моделей дозволяє формувати адекватні методи дослідження організаційно-технічних показників кібербезпеки високого рівня.

У той же час FSCI недостатньо використовуються у практиці оцінювання загроз та збитків у кіберпросторі. В Україні відповідні підходи досліджені недостатньо, теоретично не розвинуті, практично не використовуються. Це пов'язано, насамперед, з недостатнім розвитком та імпорт-орієнтованістю національного ринку кібербезпеки.

Основною метою даного наукового дослідження є розроблення та теоретико-методологічне обґрунтування підходів до використання FSCI як інструменту комплексного оцінювання рівня кібербезпеки та ступеня зрілості корпоративних інформаційних активів. Зазначені індекси розглядаються як кількісні інтегральні показники, що відображають динаміку стану кіберзахисту в умовах функціонування цифрової економіки та глобалізованих фінансових ринків.

Для досягнення поставленої мети у дослідженні визначено низку взаємопов'язаних завдань. Зокрема, здійснюється системний аналіз існуючих FSCI, досліджуються принципи та методології їх формування, а також оцінюються можливості практичного застосування таких індексів для аналізу стану національних систем кібербезпеки та відповідних ринків. Окрему увагу приділено розробленню підходів до моделювання поведінки окремих FSCI, виявленню закономірностей їх змін у часі та обґрунтуванню доцільності використання цих індексів у процесах стратегічного планування й управління кіберризиками.

У роботі розглядаються методологічні засади формування фінансових індексів кібербезпеки з урахуванням сукупності мережевих, технологічних та економічних показників, які відображають як рівень захищеності інформаційних систем, так і фінансово-економічні аспекти діяльності суб'єктів ринку. Проаналізовано підходи та алгоритми побудови наявних FSCI, визначено їх переваги та обмеження, а також запропоновано гібридну модель фінансового індексу кібербезпеки, що дозволяє інтегрувати різнорідні показники в єдину аналітичну метрику.

Крім того, у дослідженні вивчено можливості застосування окремих індикаторів фінансових індексів у межах національної системи кібербезпеки, зокрема для моніторингу її стану та оцінювання ефективності реалізації державної політики у сфері кіберзахисту. Запропоновано використання таких індексів як джерела даних для збору, узагальнення та аналітичної обробки кіберстатистики, що створює передумови для підвищення обґрунтованості управлінських рішень і розвитку інструментарію кількісної оцінки кібербезпеки на макро- та мікрорівнях.

Ринок кібербезпеки в Україні

У 2025 році було проведено перше комплексне дослідження ринку кібербезпеки України DataDriven за ініціативою підкомітету з кібербезпеки EBA та CyberTech комітету Асоціації IT Ukraine за сприяння Aspen Institute (Київ) та за підтримки Проєкту USAID «Кібербезпека критично важливої інфраструктури України» [3].

Згідно з [3], український ринок кібербезпеки продемонстрував суттєве зростання, збільшившись у чотири рази протягом останніх восьми років і досягнувши у 2024 році обсягу близько 138 млн доларів США. Показовим є практично двократне зростання в умовах повномасштабної агресії та кібервійни російської федерації. Згідно з прогнозами, у середньостроковій перспективі (до 2029 року) очікується подальше зростання ринку приблизно на 50%, що дозволить йому досягти рівня 209 млн доларів США. Провідним сегментом залишається мережева безпека, водночас найбільш динамічний розвиток демонструють напрями хмарної безпеки, захисту даних та кінцевих точок, що відображає зростаючий попит на сучасні технологічні рішення в умовах цифрової трансформації.

Встановлено, що повномасштабна війна спричинила істотне зростання інтенсивності та складності кібератак, що, своєю чергою, зумовило підвищений попит на автоматизовані та інноваційні засоби захисту, на відміну від глобального ринку, де домінують безпекові послуги. Основними об’єктами атак та захисту залишаються державні органи, підприємства оборонно-промислового комплексу, телекомунікаційний сектор, фінансові установи та енергетика. За перше півріччя 2025 року в Україні зафіксовано 3018 кіберінцидентів, що на 17% перевищує показник попереднього року. Найбільш поширеними типами атак є атаки програм-здирників (*ransomware*), фішинг (*phishing*) та відмова в обслуговуванні (*DDoS*).

Світовий ринок кібербезпеки за підсумками 2024 року сягнув 186 млрд доларів США, при цьому частка України залишається меншою за 0.1%. Водночас темпи зростання українського ринку кібербезпеки випереджають світові (практично, удвічі). Також Україна відіграє роль важливого інноваційного центру, випереджаючи низку країн за рівнем кіберекспертизи завдяки розвитку R&D-напряму та створенню прикладних рішень.

Ключовими драйверами розвитку українського ринку кібербезпеки є цифровізація економіки, зростання ризиків фінансових і репутаційних втрат від кібератак, постійний тиск на критичну інфраструктуру, активніше використання технологій штучного інтелекту, а також підтримка з боку міжнародних програм технічної допомоги. Інновації, у першу чергу, застосування штучного інтелекту та блокчейн-технологій, формують нові підходи до кіберзахисту, в той час, як концепція «нульової довіри» визначає нові моделі поведінки користувачів.

Методологічні основи формування фінансових (біржових) індексів кібербезпеки

Методологічні основи формування FSCI спираються на аналіз методології формування окремих індексів, наведених у *Таблиці 1*. Аналіз методології формування експертних індексів кібербезпеки раніше проводився авторами статті, а також О. Трофимчуком, А. Давидюком, А. Жиліним та іншими, в термінах мережевих показників кібербезпеки.

Таблиця 1. Фінансові (біржові) індекси кібербезпеки

Index		1st Edition	Editions/ year	Indicators Qty	Rate Entities Qty
Кіберіндекс BVP Nasdaq Emerging Cloud [4]	BVPCI	2011	multi	1	68
Індекс кібербезпеки MSCI [5]	CSI	2017	4	6	49
Індекс ефективності кібербезпеки [6]	CSPI	2016	multi	6	14
Індекс кібербезпеки Evolve Fund [7]	ECSIF	2017	multi	3	38
Індикатор кіберризиків FICO [8]	FCRS	2001	multi	5	>21 mil.
Індекс кібербезпеки та безпечності даних Foxberry [9]	FXCI	2013	2	2	49
Індекс кібербезпеки ISE [10]	HXR	2010	multi	3	60
Оперативний глобальний індекс кібербезпеки [11]	IECSI	2017	2	9	10-50
«Чистий» кіберіндекс [12]	IPCI	2015	1	3	30
Індекс кібербезпеки S&P [13]	KCSI	2013	Multi	5	n/a
Індекс майбутньої безпеки S&P [14]	KSEC UREP	2013	Multi	7	n/a
Індекс кібербезпеки Nasdaq [15]	NQC YBR	2015	Multi	6	>10
Перший індекс кіберзахисту [16]	PCDI	2017	4	3	58
Глобальний індекс кібербезпеки Soloactive [17]	SGCSI	2017	Multi	n/a	-

У межах дослідження проаналізовано 14 інформаційних джерел, що охоплюють біржові індекси, індексні методології, тематичні фінансові продукти та аналітичні матеріали провідних міжнародних індекс-провайдерів (Nasdaq, MSCI, Solactive, Indxx, SGX, Foxberry, S&P Dow Jones Indices тощо).

Nasdaq CTA Cybersecurity Index (NQCYBR™) є одним з найбільш репрезентативних галузевих індексів, який відстежує динаміку публічних компаній, що здійснюють основну діяльність у сфері кібербезпеки. Методологія індексу базується на галузевій класифікації Consumer Technology Association (CTA) та використовує ринково-капіталізаційне зважування з періодичним переглядом складу. Індекс має глобальне охоплення та використовується як базовий індикатор для низки біржових фондів (ETF).

Indxx Cybersecurity Index застосовує більш жорсткий підхід до відбору компаній, вимагаючи, щоб щонайменше 50% їхньої виручки генерувалося у сфері кібербезпеки. Ваги компонентів визначаються за модифікованою ринковою капіталізацією з обмеженням концентрації, що знижує домінування найбільших емітентів.

MSCI Cybersecurity Index формує склад на основі власної тематичної класифікації MSCI та поєднує критерії галузевої приналежності, ліквідності та ринкової капіталізації. Методологія MSCI є детально формалізованою та орієнтованою на інституційних інвесторів, що підвищує стабільність індексу, але водночас зменшує його чутливість до швидких технологічних змін.

Solactive Cybersecurity Index (у тому числі ESG-орієнтовані версії) поєднує класичні принципи ринково-капіталізаційного зважування з додатковими фільтрами сталого розвитку. У результаті склад індексу формується не лише з урахуванням технологічної спеціалізації компаній, але й їх відповідності ESG-критеріям, що впливає на структуру ризиків та дохідності.

iEdge–FactSet Thematic Indices (SGX) та Foxberry Thematic Cybersecurity Indices представляють підхід тематичного індексування, за якого компанії включаються до індексу на основі аналітичних моделей експозиції до певної теми (кібербезпеки), незалежно від формальної галузевої класифікації. Такий підхід підвищує гнучкість, але знижує прозорість критеріїв добору.

Інші розглянуті джерела (Vontobel, Evolve ETFs, S&P Kensho Cyber Security Index) здебільшого описують індексні фінансові продукти або похідні інструменти, що відтворюють поведінку базових індексів кібербезпеки, а не формують власні незалежні індексні методології.

Спільні риси:

- використання тематичного або галузевого підходу до відбору компаній;
- домінування ринково-капіталізаційного або модифікованого ринково-капіталізаційного зважування;
- використання автоматизованих технічних засобів для формування окремих показників індексів;
- регулярне ребалансування та перегляд складу (квартальний або піврічний);
- орієнтація на публічні компанії з достатньою ліквідністю;
- глобальний характер індексів.

Відмінності:

- критерії включення (виручка від кібербезпеки, тематична експозиція, галузева класифікація);
- використання або відсутність ESG-фільтрів;
- ступінь концентрації портфеля;
- різна прозорість алгоритмів тематичного відбору;
- чутливість до технологічних інновацій проти фінансової стабільності.

На основі синтезу проаналізованих підходів пропонується узагальнений підхід для формування фінансового індексу кібербезпеки, який включає такі етапи і може бути використаний у національній системі кібербезпеки:

- Визначення цільового призначення індексу (інвестиційний, аналітичний, регуляторний);
- Формування наборів активів або показників (публічні компанії, ADR/GDR, мінімальні вимоги до ліквідності);
- Тематична ідентифікація (частка доходів від кібербезпеки, продуктова спеціалізація, експертна класифікація);
- Фільтрація ризиків (капіталізаційні пороги, ESG-обмеження за потреби);
- Визначення ваг (ринкова або модифікована капіталізація з обмеженням концентрації);
- Ребалансування та перегляд складу з фіксованою періодичністю (не рідше 1 разу на рік);
- Публікація та прозорість методології для забезпечення відтворюваності результатів.

Аналіз доступних даних свідчить про обмежену можливість емпіричних досліджень, оскільки відкриті джерела забезпечують доступ до методології, складу індексів та агрегованих показників, однак історичні часові ряди значень індексів у більшості випадків є обмежено доступними або платними. Це унеможливлює повноцінне відтворення динаміки індексів та проведення кількісного кореляційного аналізу без використання ліцензованих фінансових баз даних (Bloomberg, Refinitiv, FactSet). Разом з тим, аналіз публічно доступних агрегованих даних свідчить про високу кореляцію індексів кібербезпеки, а також про відмінності у поведінці ESG-орієнтованих та чисто тематичних індексів у періоди підвищеної ринкової волатильності. Приклад доступних для аналізу індексів групи NASDAQ наведено на *Рис. 1*.

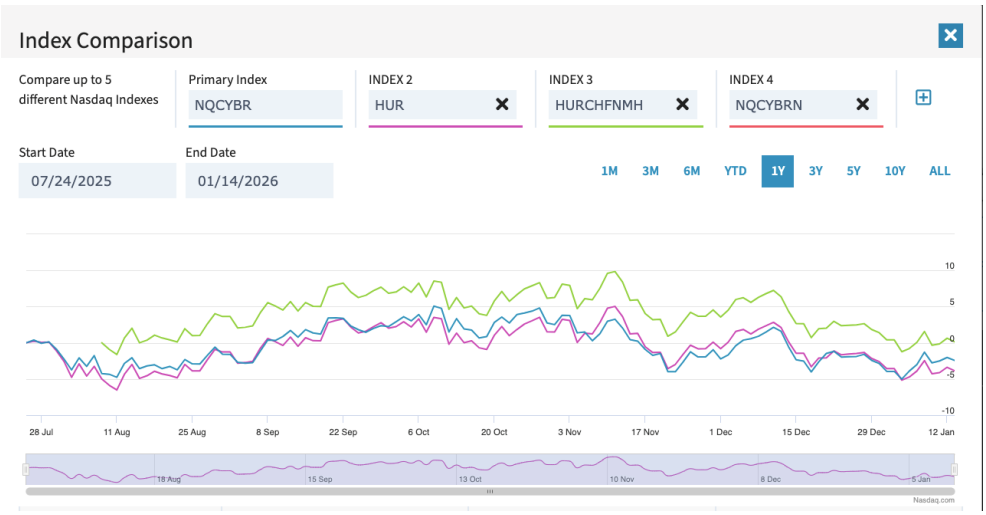


Рис. 1. Індекси групи NASDAQ
(24.07.2025-14.01.2026, взято з https://indexes.nasdaqomx.com/)

Синхронізована поведінка індексів свідчить про єдине джерело походження даних та використання однотипної методології їх формування.

Проведений аналіз свідчить про те, що фінансові (біржові) індекси кібербезпеки можуть виступати ефективним інструментом оцінки розвитку галузі та фінансових очікувань.

Сфери використання:

- у корпоративному управлінні (бенчмаркінг інвестицій у кіберзахист, управління масивами даних про учасників ринку для прийняття рішень, зокрема на ринку страхування);
- у наукових дослідженнях (аналіз зрілості ринку кібербезпеки та його інтеграції у глобальний ринок, кореляція між мережевими та економічними показниками);
- у державній політиці (індикатор інноваційного та технологічного розвитку).

Гібридна модель FSCI з мережевою складовою

Гібридна модель індексу кібербезпеки ґрунтується на припущенні, що фінансова оцінка кібербезпеки є відображенням як реального технічного стану цифрових активів, так і здатності організації управляти цими ризиками з економічної точки зору. Таким чином, модельний FSCI інтегрує мережеві показники, які фіксують фактичний рівень експозиції до кіберзагроз, та фінансово-управлінські показники, що характеризують стійкість, масштабованість і комерційну ефективність системи кібербезпеки.

Домени моделі:

- Мережево-операційний домен (Network & Exposure Domain, NED);
- Фінансово-стратегічний домен (Financial & Governance Domain, FGD).

Кожен домен формує окремий субіндекс, які разом утворюють інтегральний фінансовий індекс кібербезпеки.

Склад мережево-операційного домену (NED) (запропоновано у спрощеному вигляді Monitoring Network Index з [18]):

- мережевий трафік (DNS-запити та відповіді, BGP-з’єднання);
- наявність шкідливого або аномального трафіку (DDoS, brute force);
- експозиція відкритих сервісів (Open DNS, Open NTP, Open SNMP, Open SSDP, Open CHARGEN);
- ідентифікація компрометованих систем;
- цифрова ідентичність і репутація (IP/Domain Reputation, Brand Monitoring);
- активність (зловмисна активність) на кінцевих пристроях та IoT;
- показники атак (Attack Surface, Digital Footprint).

Ці показники мають переважно кількісну природу та оновлюються з високою частотою.

Склад фінансово-стратегічного домену (FGD) (запропоновано на основі аналізу та узагальнення показників FSCI з [4-17]):

- точність даних і прозорості процесів, інституційна довіра (Data accuracy, Process transparency);
- управління ризиками та інцидентами (Risk context, Issue management);
- інтеграція та масштабованість (Integration, Breadth of use case);
- стратегічний розвиток (Product roadmap, Go-to-market strategy);
- комерційна ефективність (Commercial strategy, Pricing innovation);
- екосистемна зрілість (Customers, Community support, API extensibility).

Ці показники можуть деталізуватися у залежності від ринкових умов та задач і мають низьку частоту оновлення, але вищу прогностичну цінність.

Зазначимо, що доменна структура FSIB в рамках гібридної моделі відповідає аналогічній структурі індексу кіберстрахування (зрілості кіберстрахування), запропонованого у [19].

Розрахунок індексу відбувається в рамках загального підходу для індексів кібербезпеки, викладеного у [1].

Запропонована модель може бути використана для формування біржових та тематичних біржових інвестиційних механізмів (зокрема, ETF), порівняльного аналізу компаній і секторів, оцінювання зрілості національної системи кібербезпеки в цілому, виявлення фінансових ризиків та проведення ринкових корекцій, пов'язаних із кіберінцидентами.

FSCI відображають агреговані ринкові очікування щодо вартості компаній у секторі кібербезпеки. Проте поведінка цих індексів є результатом взаємодії численних суб'єктів ринку (інвесторів, корпорацій, державних та міжнародних організацій). У такому середовищі з метою подальшого моделювання процесів можливо використовувати кооперативні ігрові моделі [20] (зокрема, теоретико-ігрові ресурсні кооперативні моделі [21] можуть моделювати не лише конфлікти, але й стратегічну кооперацію між агентами у створенні цінності). Ресурсами моделі в контексті кібербезпеки можуть бути: технологічні ноу-хау та інтелектуальна власність, людський капітал, спеціалізовані інфраструктурні рішення, інформаційні активи (наприклад, у задачі оптимізації ресурсів страхування або кіберстрахування). Однак класичні теоретико-ігрові рішення можуть бути непрактичними без адаптації для систем з великою кількістю агентів з розподілом за ролями.

З урахуванням наведених міркувань теоретико-ігрові кооперативні моделі можуть використовуватися для моделювання стратегічних взаємодій агентів, що впливають на поведінку фінансових індексів кібербезпеки за умов їх подальшої адаптації до реалій фінансових ринків, включно з визначенням релевантних характеристичних функцій і способів емпіричної валідації.

Висновки

У роботі розглянуті методологічні основи формування фінансових (біржових) індексів кібербезпеки, проаналізовано методології формування існуючих індексів та запропоновано гібридну модель фінансового індексу кібербезпеки з мережевою складовою. Запропоновано застосування окремих показників індексів у національній системі кібербезпеки, а також їх використання для збору та обробки даних кіберстатистики.

Проаналізовано можливість використання теоретико-ігрових ресурсних кооперативних моделей для прогнозування поведінки окремих фінансових індексів кібербезпеки, а також спільне використання фінансових індексів кібербезпеки разом з індексом кіберстрахування (зрілості кіберстрахування) у практичних задачах.

Отримані результати можна використовувати для оцінки стану корпоративних інформаційних активів (ресурсів) з метою оптимізації прийняття рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Худинцев, М.М., Жилін, А.В., & Давидюк, А.В. (2021). Світові індекси кібербезпеки: огляд та методики формування (Глобальний звіт / Каталог). Київ: Міжнародний університет кібербезпеки, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. ISBN 978-966-136-887-2. 240 с.
2. Khudyntsev, M., Lebid, O., Bychenok, M., Zhylin, A., & Davydiuk, A. (2023). Network Monitoring Index in the Information Security Management System of Critical Information Infrastructure Objects. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_17
3. European Business Association. (2024). Український ринок кібербезпеки зріс у чотири рази за вісім років. https://eba.com.ua/ukrayinskyj-rynok-kiberbezpeky-zris-u-chotyry-razy-za-visim-rokiv/
4. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ OMX Cloud Computing Index (EMCLOUD): Index overview. https://indexes.nasdaqomx.com/Index/Overview/EMCLOUD
5. MSCI Inc. (n.d.). MSCI Cybersecurity Index methodology. https://www.msci.com/eqb/methodology/meth_docs/MSCI_CyberSecurity_Index_Methodology.pdf
6. Vontobel. (n.d.). Tracker certificate on cybersecurity thematic index (CH0292584718). https://markets.vontobel.com/en-ch/products/thematic/tracker-certificates/CH0292584718
7. Evolve ETFs. (2020). Evolve Cyber Security Index Fund (CYBR): Fact sheet (February 28, 2020). https://evolveetfs.com/wp-content/uploads/2020/03/CYBR-FactSheet-February-28-2020.pdf
8. Fair Isaac Corporation. (n.d.). FICO® score: How it works. https://www.myfico.com/products/fico-score-how-it-works
9. Foxberry Ltd. (n.d.). Cybersecurity & data privacy thematic index. https://www.foxberry.com/indices/thematics/cybersecurity_data_privacy_pr
10. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ Healthcare Index (HXR): Methodology. https://indexes.nasdaqomx.com/docs/Methodology_HXR.pdf
11. Singapore Exchange. (2020). iEdge–FactSet thematic indices: Index methodology (Version 2.2). https://api2.sgx.com/sites/default/files/2020-01/SGX%20Index%20Services_iEdge-FactSet%20Thematic%20Indices%20-%20Index%20Methodology_v2.2_20200117_1.pdf
12. INDXX. (n.d.). INDXX Cybersecurity Index. https://www.indxx.com/index/indxx-cybersecurity-index
13. S&P Dow Jones Indices. (n.d.). S&P Kensho™ Cyber Security Index. https://www.spglobal.com/spdji/en/indices/equity/sp-kensho-cyber-security-index/
14. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ Cybersecurity Index: Fact sheet (NQCYBRT). https://indexes.nasdaqomx.com/docs/FS_NQCYBRT.pdf
15. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ Cybersecurity Index: Methodology (NQCYBR). https://indexes.nasdaqomx.com/docs/Methodology_NQCYBR.pdf
16. Solactive AG. (n.d.). Solactive cybersecurity index: Fact sheet (DE000SLA3UE7). https://www.solactive.com/wp-content/uploads/solactiveip/en/Factsheet_DE000SLA3UE7.pdf
17. Solactive AG. (n.d.). Solactive cybersecurity index (DE000SLA3WC7). https://www.solactive.com/Indices/?index=DE000SLA3WC7
18. Khudyntsev, M., Lebid, O., Bychenok, M., Zhylin, A., & Davydiuk, A. (2023). Network Monitoring Index in the Information Security Management System of Critical Information Infrastructure Objects. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_17
19. Худинцев, М.М., & Хоменко О.А. (2025). Інформаційні технології кіберстрахування. *Електрон. Моделювання*, *47*(6), 100-111. https://doi.org/10.15407/emodel.47.06

20. Branzei, R., Dimitrov, D., & Tijs, S. (2005). Models in cooperative game theory: Crisp, fuzzy, and multi-choice games (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 556). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-28509-1
21. Горда, С. Є. (2018). Методи ресурсного теоретико-ігрового аналізу процесів регіонального розвитку (Автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук). Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України. https://itgip.org/wp-content/uploads/2019/01/a_regorda-1111.pdf

Стаття надійшла до редакції 23.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 06.11.2025

REFERENCES

1. Khudyntsev, M.M., Zhylin, A.V., & Davydiuk, A.V. (2021). World Cybersecurity Indices: Overview and Formation Methods (Global Report / Catalog). Kyiv: International Cybersecurity University, G.E. Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering of the NAS of Ukraine. ISBN 978-966-136-887-2. [in Ukrainian].
2. Khudyntsev, M., Lebid, O., Bychenok, M., Zhylin, A., & Davydiuk, A. (2023). Network Monitoring Index in the Information Security Management System of Critical Information Infrastructure Objects. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_17
3. European Business Association. (2024). Ukrainian cybersecurity market has grown fourfold in eight years. https://eba.com.ua/ukrayinskyj-rynok-kiberbezpeky-zris-u-chotyry-razy-za-visim-rokiv/
4. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ OMX Cloud Computing Index (EMCLOUD): Index overview. https://indexes.nasdaqomx.com/Index/Overview/EMCLOUD
5. MSCI Inc. (n.d.). MSCI Cybersecurity Index methodology. https://www.msci.com/eqb/methodology/meth_docs/MSCI_CyberSecurity_Index_Methodology.pdf
6. Vontobel. (n.d.). Tracker certificate on cybersecurity thematic index (CH0292584718). https://markets.vontobel.com/en-ch/products/thematic/tracker-certificates/CH0292584718
7. Evolve ETFs. (2020). Evolve Cyber Security Index Fund (CYBR): Fact sheet (February 28, 2020). https://evolveetfs.com/wp-content/uploads/2020/03/CYBR-FactSheet-February-28-2020.pdf
8. Fair Isaac Corporation. (n.d.). FICO® score: How it works. https://www.myfico.com/products/fico-score-how-it-works
9. Foxberry Ltd. (n.d.). Cybersecurity & data privacy thematic index. https://www.foxberry.com/indices/thematics/cybersecurity_data_privacy_pr
10. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ Healthcare Index (HXR): Methodology. https://indexes.nasdaqomx.com/docs/Methodology_HXR.pdf
11. Singapore Exchange. (2020). iEdge–FactSet thematic indices: Index methodology (Version 2.2). https://api2.sgx.com/sites/default/files/2020-01/SGX%20Index%20Services_iEdge-FactSet%20Thematic%20Indices%20-%20Index%20Methodology_v2.2_20200117_1.pdf
12. INDXX. (n.d.). INDXX Cybersecurity Index. https://www.indxx.com/index/indxx-cybersecurity-index
13. S&P Dow Jones Indices. (n.d.). S&P Kensho™ Cyber Security Index. https://www.spglobal.com/spdji/en/indices/equity/sp-kensho-cyber-security-index/
14. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ Cybersecurity Index: Fact sheet (NQCYBRT). https://indexes.nasdaqomx.com/docs/FS_NQCYBRT.pdf
15. Nasdaq OMX. (n.d.). NASDAQ Cybersecurity Index: Methodology (NQCYBR). https://indexes.nasdaqomx.com/docs/Methodology_NQCYBR.pdf

16. Solactive AG. (n.d.). Solactive cybersecurity index: Fact sheet (DE000SLA3UE7). https://www.solactive.com/wp-content/uploads/solactiveip/en/Factsheet_DE000SLA3UE7.pdf
17. Solactive AG. (n.d.). Solactive cybersecurity index (DE000SLA3WC7). https://www.solactive.com/Indices/?index=DE000SLA3WC7
18. Khudyntsev, M., Lebid, O., Bychenok, M., Zhylin, A., & Davydiuk, A. (2023). Network Monitoring Index in the Information Security Management System of Critical Information Infrastructure Objects. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_17
19. Khudyntsev, M.M., & Khomenko, O.A. (2025). Information technologies of cyber insurance. *Electronic modeling*, *47*(6), 100-111. https://doi.org/10.15407/emodel.47.06
20. Branzei, R., Dimitrov, D., & Tijs, S. (2005). Models in cooperative game theory: Crisp, fuzzy, and multi-choice games (Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 556). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-28509-1
21. Gorda, S. Ye. (2018). Methods of resource-theoretical game analysis of regional development processes (Author's dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences). Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine. https://itgip.org/wp-content/uploads/2019/01/a_regorda-1111.pdf [in Ukrainian].

The article was received 23.08.2025 and was accepted after revision 06.11.2025

Турчинов Олександр Валентинович
доктор економічних наук, професор, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-6014-2687 ***e-mail:*** oleksandr@turchynov.com

Худинцев Микола Миколайович
кандидат фізико-математичних наук, доцент, академік Академії зв'язку України, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9324-6901 ***e-mail:*** nh@te.net.ua

Клименков Олег Анатолійович
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7664-5225 ***e-mail:*** oleg@klymenkov.com

Хоменко Олексій Антонович
аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-4866-8244 ***e-mail:*** oleksii.khomenko.sci@gmail.com

Палажченко Ігор Леонідович
аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-0491-7068 ***e-mail:*** palazhchenko.ihor@gmail.com

УДК 502.51:504.5

Serhii Fadeichev, postgraduate
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-1594-9683 ***e-mail:*** serhii.fadeichev@itgip.org

Oleksandr Trofymchuk, Corresponding Member of the NASU, Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3358-6274 ***e-mail:*** trofymchuk@nas.gov.ua

Vasyl Trysnyuk, Doctor of Technical Sciences, Professor
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9920-4879 ***e-mail:*** trysnyuk@ukr.net

Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SYNERGY OF QUANTUM COMPUTING AND FEDERATED LEARNING IN INFORMATION TECHNOLOGY DETECTION OF HIDDEN TARGET GROUPS

Abstract. *The article considers the information technology of detecting hidden target groups in large distributed data sets based on the synergy of quantum computing and federated learning. It is shown that in modern information systems for analyzing big data, traditional methods of machine learning and intelligent analysis demonstrate limited effectiveness in identifying poorly represented or hidden structures, especially under conditions of statistical imbalance of samples, high dimensionality of the feature space and distributed storage of information. The proposed approach combines federated learning as an information technology of distributed model formation without data centralization with quantum algorithms of amplitude amplification, which allows to increase sensitivity to weak signals in subspaces with increased information significance. The paper considers the architecture of a hybrid information technology, which includes classical computing nodes, a level of federated aggregation and a quantum computing module, as well as a structural and algorithmic scheme of interaction of classical and quantum components. The algorithmic aspects of the implementation of the proposed approach are analyzed, taking into account the limitations of modern quantum computing platforms of the NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) class, in particular the limited number of qubits and the influence of noise. It is shown that the use of selective quantum processing and iterative interaction between classical and quantum circuits allows to ensure the reproducibility of the results and the possibility of practical implementation of the proposed information technology. The proposed approach is a promising direction in the development of information technologies for analyzing large distributed data and can be used as a theoretical and applied basis for further research in the field of hybrid classical-quantum computing systems.*
Keywords: *information technologies, federated learning, quantum computing, hybrid algorithms, big data analysis, hidden target groups.*

© С.В. Фадейчев, О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк, 2025

С.В. Фадейчев, О.М. Трофимчук, В.М. Триснюк

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

СИНЕРГІЯ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ ТА ФЕДЕРАТИВНОГО НАВЧАННЯ В ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ЦІЛЬОВИХ ГРУП

Анотація. *У статті розглянуто інформаційну технологію виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних на основі синергії квантових обчислень та федеративного навчання. Показано, що у сучасних інформаційних системах аналізу великих даних традиційні методи машинного навчання та інтелектуального аналізу демонструють обмежену ефективність у задачах ідентифікації слабко представлених або прихованих структур, особливо за умов статистичної незбалансованості вибірок, високої розмірності простору ознак та розподіленого зберігання інформації. Запропонований підхід поєднує федеративне навчання як інформаційну технологію розподіленого формування моделей без централізації даних із квантовими алгоритмами амплітудного підсилення, що дозволяє підвищити чутливість до слабких сигналів у підпросторах із підвищеною інформаційною значущістю. У роботі розглянуто архітектуру гібридної інформаційної технології, що включає класичні обчислювальні вузли, рівень федеративної агрегації та квантовий обчислювальний модуль, а також структурно-алгоритмічну схему взаємодії класичних і квантових компонентів. Проаналізовано алгоритмічні аспекти реалізації запропонованого підходу з урахуванням обмежень сучасних квантових обчислювальних платформ класу NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), зокрема обмеженої кількості кубітів і впливу шумів. Показано, що використання вибіркової квантової обробки та ітераційної взаємодії між класичним і квантовим контурами дозволяє забезпечити відтворюваність результатів і можливість практичного впровадження запропонованої інформаційної технології. Отримані результати підтверджують перспективність запропонованого підходу для розвитку сучасних інформаційних технологій аналізу великих розподілених даних.*

Ключові слова: *інформаційні технології, федеративне навчання, квантові обчислення, гібридні алгоритми, аналіз великих даних, приховані цільові групи.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.114-122

Вступ

Сучасні інформаційні системи функціонують в умовах стрімкого зростання обсягів даних, що формуються у розподілених середовищах, включаючи хмарні платформи, периферійні обчислювальні вузли, телекомунікаційні мережі та кіберфізичні системи. Значна частина прикладних задач аналізу таких даних пов’язана з необхідністю виявлення прихованих або слабко представлених цільових груп, які мають високу практичну цінність, але не домінують у загальному масиві інформації.

Класичні методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних, як правило, орієнтовані на оптимізацію середніх характеристик і демонструють знижену чутливість до рідкісних або прихованих структур.

Додаткові ускладнення створюють вимоги до конфіденційності, обмеження на централізацію даних та висока обчислювальна складність алгоритмів при зростанні розмірності простору ознак.

У цьому контексті перспективним напрямом є поєднання федеративного навчання та квантових обчислень, що дозволяє одночасно вирішувати задачі розподіленої обробки даних і підвищення ефективності пошуку у великих просторах станів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика виявлення прихованих або слабко представлених цільових груп у великих розподілених масивах даних широко представлена в сучасних дослідженнях з інформаційних технологій, машинного навчання та високопродуктивних обчислень. Існуючі підходи умовно поділяються на централізовані, розподілені та гібридні, кожен з яких має власні переваги й обмеження.

У роботах зарубіжних дослідників, зокрема Aledhari M., Razzak R., Parizi R.M., Saeed F. та інших, розглядаються інформаційні моделі аналізу великих даних у розподілених середовищах, орієнтовані на оптимізацію ресурсів і підвищення ефективності виявлення цільових структур [1]. Запропоновані ними підходи базуються на класичних алгоритмах машинного навчання та статистичного аналізу, що забезпечують хороші результати за умов відносно збалансованих вибірок, але втрачають ефективність при роботі з рідкісними або прихованими групами.

Значний пласт досліджень присвячений використанню розподілених обчислювальних платформ та програмно-визначених середовищ для аналізу великих даних. Так, у роботах Shor P.W., Li Q., Wen Z., Wu Z., Yang Q., Liu Y., Chen T., Tong Y., Mohamed H. Elsayed, та Ahmed Mohamed розглядаються інформаційні технології, що поєднують розподілену обробку даних із динамічними механізмами адаптації моделей [2, 3, 4]. Ці підходи дозволяють масштабувати обчислення, однак потребують централізованого доступу до параметрів моделей, що ускладнює застосування в умовах підвищених вимог до конфіденційності.

Окрему групу становлять дослідження, присвячені побудові когнітивних і самоадаптивних інформаційних систем. У працях Schuld M., Petruccione F., Havlíček V., Córcoles A.D., Temme K., Kandala A., Mezzacapo A., Bonawitz K., Ivanov V., Kreuter B. запропоновано інформаційні підходи, що використовують адаптивні алгоритми аналізу середовища для виявлення оптимальних стратегій обробки даних [5, 6, 7, 8]. Хоча ці методи демонструють високу адаптивність, вони орієнтовані переважно на локальні оптимізації та не забезпечують ефективного пошуку прихованих глобальних структур у великих розподілених датасетах.

Важливим напрямом є застосування федеративного навчання як інформаційної технології розподіленого аналізу даних. У низці робіт показано, що федеративні підходи дозволяють здійснювати навчання моделей без централізації даних, що суттєво знижує ризики витоку інформації. Водночас агреговані моделі часто втрачають чутливість до слабких сигналів, оскільки оптимізація здійснюється з урахуванням домінуючих патернів.

Суттєвий внесок у розвиток розподілених інформаційних систем та телекомунікаційних підходів до аналізу даних зроблено українськими науковцями. Зокрема, у працях професора В. Устименка розглядаються принципи побудови складних інформаційних середовищ, інтеграції

різнорідних джерел даних та підвищення достовірності інформаційних процесів у багаторівневих системах. Запропоновані підходи створюють методологічну основу для розвитку розподілених інформаційних технологій, проте не орієнтовані безпосередньо на задачі підсилення слабких або прихованих сигналів [9, 10].

Окремо слід відзначити дослідження, присвячені застосуванню квантових обчислень в інформаційних технологіях аналізу даних. У сучасних роботах квантові алгоритми розглядаються як інструмент прискорення пошуку та оптимізації у просторах великої розмірності. Проте більшість таких досліджень мають теоретичний характер або не враховують обмеження квантових процесорів класу NISQ, що ускладнює їх практичне впровадження.

Таким чином, аналіз існуючих інформаційних підходів, представлених у сучасних наукових публікаціях і джерелах, свідчить про відсутність універсального рішення для виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних. Це обґрунтовує доцільність розробки гібридної інформаційної технології, що поєднує федеративне навчання як механізм розподіленої побудови моделей із квантовими обчисленнями для підсилення слабких сигналів, що й реалізовано в межах даної роботи.

Метою цієї роботи є вдосконалення інформаційної технології виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних на основі синергії квантових обчислень та федеративного навчання з метою підвищення чутливості до слабко представлених структур і зниження обчислювальної складності аналізу даних у розподілених середовищах.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно розв’язати такі завдання:

- проаналізувати сучасні інформаційні підходи та алгоритми виявлення прихованих і слабко представлених цільових груп у великих масивах даних;
- дослідити можливості федеративного навчання як інформаційної технології розподіленої побудови моделей без централізації даних;
- проаналізувати застосування квантових алгоритмів амплітудного підсилення для підвищення ефективності пошуку у просторах великої розмірності;
- розробити концепцію синергії квантових обчислень і федеративного навчання для виявлення прихованих цільових груп;
- сформувати архітектуру інформаційної технології, що поєднує класичні та квантові обчислювальні компоненти;
- дослідити алгоритмічні аспекти реалізації запропонованої інформаційної технології з урахуванням обмежень сучасних квантових обчислювальних платформ;
- оцінити перспективи практичного застосування запропонованого підходу в інтелектуальних системах аналізу даних.

Об’єктом дослідження є процеси інформаційних технологій аналізу великих розподілених масивів даних із використанням федеративного навчання та квантових обчислювальних методів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Архітектура запропонованої інформаційної технології побудована за багаторівневим принципом і включає локальні обчислювальні вузли, рівень федеративної агрегації та квантовий обчислювальний модуль. Така архітектурна організація забезпечує масштабованість системи, адаптивність до розподілених середовищ і можливість поетапного впровадження без повної перебудови існуючої інфраструктури.

На локальному рівні здійснюється попередня обробка даних і навчання моделей машинного навчання на приватних або територіально розподілених наборах даних. Локальні моделі відображають специфіку окремих джерел інформації та дозволяють враховувати локальні особливості розподілу ознак. На рівень федеративної агрегації передаються лише параметри моделей або узагальнені статистичні характеристики, що мінімізує ризики витоку даних і зменшує навантаження на телекомунікаційні канали [5].

Федеративний сервер виконує агрегацію параметрів і формує глобальну модель, яка відображає узагальнену структуру даних у розподіленому середовищі. Результати агрегації використовуються для оцінювання імовірності належності об’єктів до прихованих цільових груп. На основі цієї оцінки формується набір кандидатів для подальшої обробки квантовим модулем.

Квантовий обчислювальний модуль інтегрується в архітектуру як допоміжний компонент і застосовується вибірково. Його функцією є реалізація квантових алгоритмів підсилення амплітуд для прискореного виявлення прихованих структур у відібраних підпросторах. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати обмежені квантові ресурси та уникати необхідності повномасштабної квантової обробки всього датасету.

Алгоритмічна реалізація запропонованої інформаційної технології враховує обмеження сучасних обчислювальних платформ, зокрема квантових процесорів класу NISQ, які характеризуються обмеженою кількістю кубітів, наявністю шумів і нестабільністю результатів. У зв’язку з цим у роботі використовується підхід батчевої обробки, за якого квантові алгоритми застосовуються до обмежених підмножин даних.

Алгоритмічна взаємодія між федеративним і квантовим компонентами реалізується у вигляді ітераційного процесу [6]. На кожній ітерації результати федеративного навчання використовуються для уточнення параметрів квантового алгоритму, після чого результати квантового підсилення можуть бути повернуті у класичний контур для подальшого донавчання моделей. Така зворотна взаємодія забезпечує адаптивність і підвищує стійкість алгоритмів до шумів і похибок.

Важливим аспектом є забезпечення відтворюваності результатів. Для цього використовуються фіксовані параметри батчування, контроль випадкових ініціалізацій і стандартизовані процедури агрегації. Це дозволяє інтегрувати запропоновану технологію у промислові інформаційні системи, де вимоги до стабільності та повторюваності є критичними.

Алгоритмічна реалізація запропонованої інформаційної технології базується на поєднанні класичних методів федеративного навчання та квантових алгоритмів амплітудного підсилення, структурна взаємодія яких представлена на рис. 1 та рис. 2. Класичний контур системи забезпечує

попередню обробку даних, навчання локальних моделей і формування узагальнених імовірнісних оцінок, тоді як квантовий контур використовується для підвищення ефективності пошуку прихованих цільових груп у підпросторах із підвищеною інформаційною значущістю.

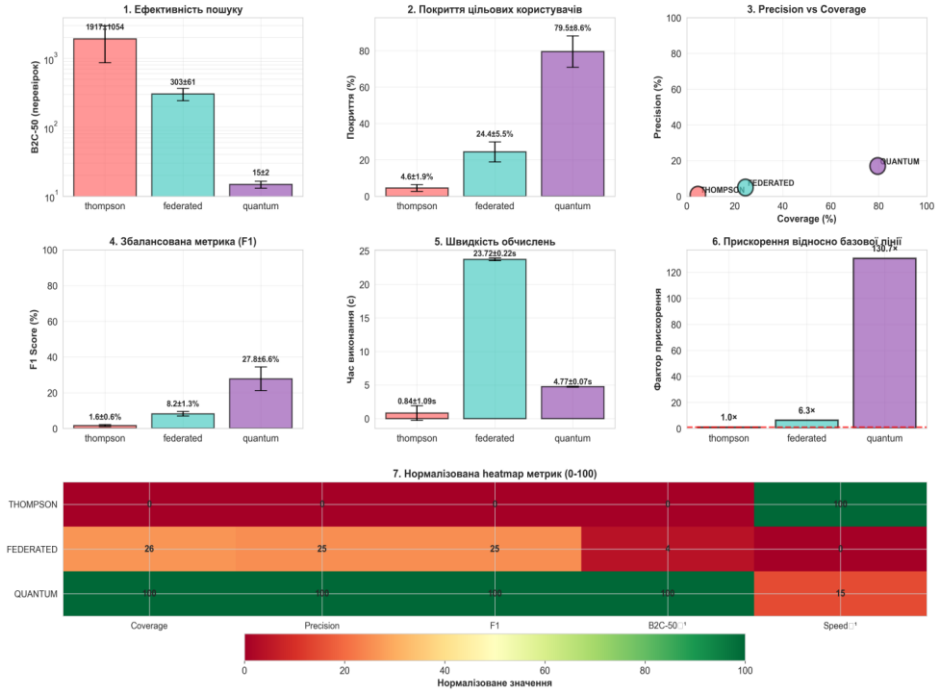


Рис. 1. Архітектура інформаційної технології на основі синергії квантових обчислень і федеративного навчання

На першому етапі локальні обчислювальні вузли виконують навчання моделей машинного навчання на власних розподілених наборах даних. Результатом цього етапу є множина параметрів моделей або імовірнісних оцінок, які характеризують належність об’єктів до потенційно цільових груп. Передавання первинних даних не здійснюється, що відповідає принципам федеративного навчання та знижує вимоги до пропускної здатності мережі.

На рівні федеративної агрегації виконується узагальнення параметрів локальних моделей із формуванням глобальної імовірнісної моделі [7]. Ця модель інтерпретується як м’яка оракул-функція, яка відображає ступінь відповідності об’єктів ознакам прихованих цільових груп. Саме ця оракул-функція використовується як вхідна інформація для квантового алгоритмічного контуру, що відображено у структурно-алгоритмічній схемі взаємодії компонентів на рис. 2.

Квантовий компонент реалізує алгоритми амплітудного підсилення, які дозволяють збільшити ймовірність виявлення об’єктів із високими значеннями м’якої оракул-функції. Застосування квантових алгоритмів обмежується підмножинами даних, сформованими на основі результатів федеративного навчання, що дозволяє суттєво зменшити розмір квантової задачі та адаптувати її до можливостей сучасних квантових процесорів.

Важливим обмеженням реалізації є використання квантових обчислювальних платформ класу NISQ, які характеризуються обмеженою кількістю кубітів, наявністю шумів і нестабільністю результатів. У запропонованій інформаційній технології ці обмеження враховано шляхом батчевої обробки даних, зменшення розмірності квантових підзадач і повторного виконання квантових алгоритмів із подальшою статистичною обробкою результатів.

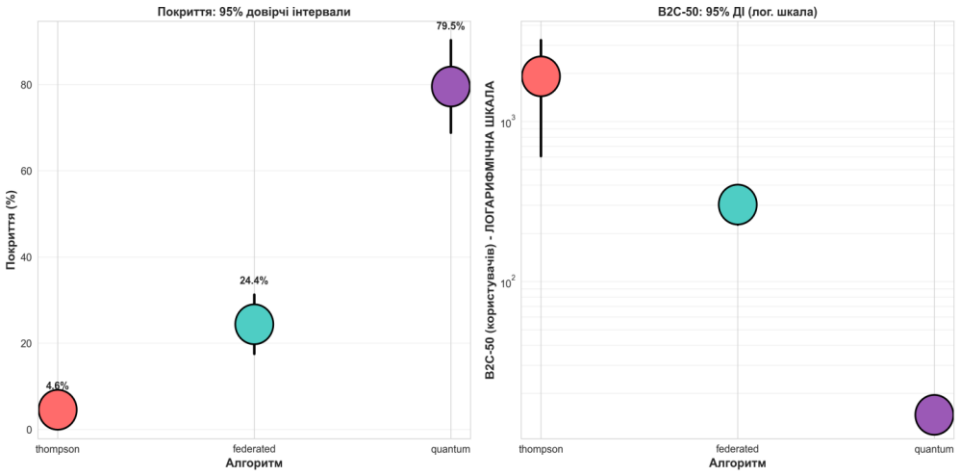


Рис. 2. Структурно-алгоритмічна схема взаємодії класичних і квантових компонентів

Алгоритмічна взаємодія між класичним і квантовим контурами реалізується в ітераційному режимі. Результати квантового підсилення можуть використовуватися для корекції параметрів класичних моделей і уточнення м'якої оракул-функції, що забезпечує адаптивність системи та підвищує її стійкість до шумів і похибок [8]. Така схема взаємодії дозволяє інтегрувати квантові обчислення в класичні інформаційні технології без порушення їхньої цілісності та відтворюваності.

Таким чином, алгоритмічні рішення, реалізовані в межах запропонованої інформаційної технології, забезпечують ефективну взаємодію федеративного навчання та квантових обчислень, що дозволяє підвищити чутливість до прихованих цільових груп за умови дотримання реальних апаратних і програмних обмежень.

Висновки

У статті представлено інформаційну технологію виявлення прихованих цільових груп у великих розподілених масивах даних на основі синергії квантових обчислень та федеративного навчання. Показано, що поєднання розподіленого навчання моделей без централізації даних із квантовими алгоритмами амплітудного підсилення дозволяє подолати обмеження класичних методів аналізу даних, пов'язані зі статистичною незбалансованістю та високою розмірністю простору ознак.

Запропонована архітектура інформаційної технології забезпечує масштабованість, адаптивність і можливість практичного впровадження в сучасні інформаційні системи. Алгоритмічні рішення враховують реальні обмеження квантових обчислювальних платформ і орієнтовані на поступову інтеграцію квантових методів у класичні інформаційні процеси.

Отримані результати свідчать, що запропонований підхід є перспективним напрямом розвитку інформаційних технологій аналізу великих розподілених даних і може бути використаний як теоретична та прикладна основа для подальших досліджень у галузі гібридних класично-квантових обчислювальних систем.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Aledhari, M., Razzak, R., Parizi, R. M., & Saeed, F. (2020). Federated learning: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Access, 8*, 140699–140725. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013541
2. Shor, P. W. (1999). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Review, 41*(2), 303–332. https://doi.org/10.1137/S0036144598347011
3. Li, Q., Wen, Z., Wu, Z., et al. (2021). A survey on federated learning systems: Vision, hype and reality for data privacy and protection. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 35*(1), 573–588. https://doi.org/10.1109/TKDE.2021.3124599
4. Yang, Q., Liu, Y., Chen, T., & Tong, Y. (2019). Federated machine learning: Concept and applications. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 10*(2), Article 12. https://doi.org/10.1145/3298981
5. Schuld, M., & Petruccione, F. (2018). *Supervised learning with quantum computers*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96424-9
6. Havlíček, V., Córcoles, A. D., Temme, K., et al. (2019). Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces. *Nature, 567*(7747), 209–212. https://doi.org/10.1038/s41586-019-0980-2
7. Kandala, A., Mezzacapo, A., Temme, K., et al. (2017). Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets. *Nature, 549*(7671), 242–246. https://doi.org/10.1038/nature23879
8. Bonawitz, K., Ivanov, V., Kreuter, B., et al. (2017). Practical secure aggregation for privacy-preserving machine learning. In *Proceedings of the 2017 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security* (pp. 1175–1191). https://doi.org/10.1145/3133956.3133982
9. Ustimenko, V., & Pustovit, O. (2025). On the postquantum protocol-based short digital signatures with multivariate maps over arithmetical rings. In K. Arai (Ed.), *Advances in information and communication* (Lecture Notes in Networks and Systems, Vol. 1285, pp. 688–699). Springer.
10. Ustimenko, V., & Pustovit, O. (2025). On symbolic computations over arbitrary commutative rings via temporal Jordan–Gauss graphs and multivariate cryptosystems. In *Proceedings of the Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems* (pp. 405–424). Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 09.09.2025 і прийнята до друку після рецензування 28.11.2025

The article was received 09.09.2025 and was accepted after revision 28.11.2025

Фадейчев Сергій Володимирович
аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0006-1594-9683 ***e-mail:*** serhii.fadeichev@itgip.org

Трофимчук Олександр Миколайович
член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: 03186, Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3358-6274 ***e-mail:*** trofymchuk@nas.gov.ua

Триснюк Василь Миколайович
доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9920-4879 ***e-mail:*** trysnyuk@ukr.net

УДК 532.465, 519.63, 004.272.2

Oleksandr Shyptsov[1,2], Doctor of Geographical Sciences, Professor, Corresponding Member of National Academy of Sciences of Ukraine, Chief Researcher of the Department of Problems of Marine Geology and Sedimentary Ore Formation
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6285-0663 ***e-mail:*** shiptsov53@gmail.com

[1]State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the NAS of Ukraine", Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

TSUNAMI ISSUES IN THE BLACK SEA

Abstract. *The coordinating role of the Intergovernmental Oceanographic Commission in the implementation of the Tsunami Research, Development and Implementation Plan within the framework of the UN Decade of Ocean Science for Sustainable Development (2021-2030) is considered. The structural composition of the Intergovernmental Coordination Group on the system of early warning about tsunamis and mitigation of their consequences in the North-East Atlantic, the Mediterranean Sea and adjacent seas is presented. Attention is focused on the potential threats to coastal infrastructure in the Black Sea from the probable movement of explosive objects along with the tsunami in the water areas contaminated by them. It is proposed to develop and approve the relevant provisions on the functional subsystems of early warning about tsunamis as part of the unified state civil protection system.*
Keywords: *earthquake, tsunami, hazard, UNESCO IOC programs, Black Sea, warning system, intergovernmental coordination group, functional subsystems.*

Олександр Щипцов[1,2]

[1]Державна наукова установа «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України», м. Київ, Україна
[2]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ЦУНАМІ В ЧОРНОМУ МОРІ

Анотація. *Розглянуто координуючу роль Міжурядової океанографічної комісії у реалізації Плану досліджень, розробок і здійснення програми з цунамі в рамках Десятиліття ООН, присвяченого науці про океан в інтересах сталого розвитку (2021-2030 рр.). Наведено структурний склад Міжурядової координаційної групи щодо системи раннього попередження про цунамі та пом'якшення їхніх наслідків у Північно-Східній Атлантиці, Середземному морі та прилеглих морях. Акцентовано увагу на потенційних загрозах для прибережної інфраструктури у Чорному морі від ймовірного переміщення разом з цунамі вибухонебезпечних предметів у забруднених ними акваторіях. Запропоновано розробити та затвердити відповідні положення про функціональні підсистеми раннього попередження про цунамі у складі єдиної державної системи цивільного захисту.*
Ключові слова: *землетрус, цунамі, небезпека, програми МОК ЮНЕСКО, Чорне море, система попередження, міжурядова координаційна група, функціональні підсистеми.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.123-133

© О. Щипцов, 2025

Морські геологічні небезпеки[1] становлять серйозну загрозу для прибережних і морських територій, а також громад, які там проживають. До переліку морських геологічних небезпек належать цунамі.

5 листопада людство відзначатиме Всесвітній день поширення інформації про проблему цунамі[2], тому розглянемо деякі аспекти цієї проблеми з метою підвищення обізнаності громадськості нашої держави.

Незважаючи на те, що цунамі трапляються рідше, ніж інші природні катастрофи, їхня руйнівна сила та швидкість роблять їх особливо небезпечними для узбережжя морів. Найчастіше цунамі обрушається на берег у вигляді вертикальної стіни турбулентної води, яка може мати дуже велику руйнівну силу. На рис. 1 зображено цунамі, згенероване штучним інтелектом.

Після найпотужнішого в історії спостережень землетрусу у 1960 році поблизу міста Вальдивія у Чилі магнітудою 9,5, який призвів до руйнівного цунамі з висотою хвилі 10–25 м на узбережжях Чилі, Японії, островах у Тихому океані (о. Пасхи, Гавайських островах інших), було створено першу систему попередження про цунамі – Тихоокеанську [3], а з 1965 року глобальною мережею координації попередження про цунамі керує Міжурядова океанографічна комісія, що діє у складі ЮНЕСКО (далі – МОК ЮНЕСКО).

Рис. 1. Так зобразив цунамі штучний інтелект (за посиланням: https://pixabay.com/illustrations/ai-generated-tsunami-disaster-8909290/)

Одне з найпотужніших цунамі сталося в Індійському океані після підводного землетрусу 26 грудня 2004 році на глибині близько 20 км під дном океану і приблизно за 200 км на захід від північного узбережжя острова Суматра в Індонезії магнітудою 9,1. Внаслідок цунамі, висота якого місцями сягала 15 метрів, загинуло 230-280 тис. осіб у 14 країнах (рис. 2).

---

[1] Морськими геологічними небезпеками є підводні землетруси або землетруси, що виникають неподалік від моря; підводні зсуви, хвилі цунамі, рухи тектонічних плит вздовж активних розломів, потенційні викиди газу з донних відкладів моря та екстремальні метеорологічні явища [15, 16, 23].

[2] У грудні 2015 року Генеральна Асамблея Організації Об’єднаних Націй у Сендайській рамковій програмі зі зниження ризику лих на 2015–2030 роки запровадила відзначення 5 листопада щороку Всесвітнього дня поширення інформації про проблему цунамі [2, 5].

Рис. 2. Наслідки цунамі на узбережжі Індонезії між містами Банда-Ачег і Мевлабог після підводного землетрусу та цунамі 26 грудня 2004 року в Індійському океані (фото Евана Шнайдера, © UN Photo)

Після цієї руйнівної події в Індійському океані МОК ЮНЕСКО розширила масштаби своєї діяльності та сформувала глобальну мережу попередження про цунамі та пом'якшення їхніх наслідків, яка охопила наступні небезпечні регіони: Тихий океан, Індійський океан, Карибське море, Північно-Східну Атлантику, Середземне море та прилеглі моря.

На сьогодні у рамках Десятиліття океану[3] діє Програма з цунамі на основі багаторівневого підходу, який об'єднує:

– щільну мережу сейсмічних станцій, глибоководних датчиків і мареографів;

– регіональні та національні центри оповіщення для швидкого ухвалення рішень;

– забезпечення готовності прибережних громад до цунамі через ініціативи Програми ЮНЕСКО «Готові до цунамі», яка діє у 43 країнах світу.

Метою Програми ЮНЕСКО «Готові до цунамі» є обмін даними в режимі реального часу через такі платформи, як Центри моніторингу рівня моря МОК ЮНЕСКО. Вони забезпечують досягнення таких цілей Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану [3]:

– розвивати можливості систем оповіщення для завчасних попереджень про цунамі для громад на морському узбережжі, які потенційно знаходяться під загрозою цунамі;

– до 2030 року охопити інформаційною комунікацією громади, території яких віднесено до ризикових від цунамі, щоб вони були готові та стійкі до природних лих.

---

[3] Десятиліття океану – міжнародне десятиліття наук про океан в інтересах сталого розвитку (2021–2030 рр.), яке координує Міжурядова океанографічна комісія ЮНЕСКО. У червні 2021 р. МОК ЮНЕСКО затвердила Програму з цунамі у рамках Десятиліття океану у відповідь на заклик до дій Десятиліття океану.

Принагідно зазначу, що в Парижі 16–17 січня 2025 року відбулося п'яте засідання Наукового комітету Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану. Воно стало вирішальним для оновлення процедури розгляду, планування та узгодження ініціатив Програми ЮНЕСКО «Готові до цунамі» та заходів у рамках Плану досліджень, розробок та впровадження Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану [4].

10–11 листопада 2025 року в Хайдарабаді в Індії відбудеться перша в історії конференція з питань Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану (*First Ocean Decade Tsunami Programme Conference*). Вона ознаменує важливу віху у спільній розробці рішень для формування прибережних громад, готових до стихійних лих. Захід, організований МОК ЮНЕСКО, об'єднає світових лідерів, науковців, політиків, технічних експертів та представників громадськості. Мета заходу – сприяти скоординованим діям для реалізації шостого завдання Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану: «Усі громади на територіях ризику готові до цунамі та стійкі до них до 2030 року» [22].

Європейська морська рада з морських геологічних небезпек (ЄМР) – провідний європейський аналітичний центр у галузі морської науки – надає платформу для розвитку морських досліджень та координує питання землетрусів і цунамі. Як свідчить «Позиційний документ 26» Експертної робочої групи ЄМР, за останні ~1 500 років у Чорному морі було зафіксовано 22 цунамі, спричинених землетрусами [6].

Сучасні теоретичні оцінки газо-грязьового вулканізму та прогнозів цунамі у Чорноморському басейні дають підстави не виключати ймовірності виникнення сильних цунамі у Чорному морі у майбутньому [7–16, 23].

Системи раннього попередження про цунамі

Системи раннього попередження про цунамі включають чотири основні елементи:

- знання про ризики;
- виявлення, моніторинг, аналіз і прогнозування;
- поширення попереджень та комунікація;
- забезпечення готовності та реагування.

Ці чотири елементи підкріплює розвиток потенціалу та управління» [17, с. 6].

У світі функціонують міжнародна та регіональні системи попередження про цунамі. ***Міжнародна система попередження про цунамі*** – це глобальна мережа, яку координує МОК ЮНЕСКО. Вона призначена для виявлення та завчасного оповіщення населення про цунамі, щоб мінімізувати людські жертви та матеріальні збитки. Ця система включає мережу датчиків, мареографів, регіональні центри попередження та канали зв'язку для оперативної передачі інформації від аналітичних центрів до центрів прийняття рішень та населення в цунамінебезпечних зонах.

Також МОК ЮНЕСКО створив глобальні служби попередження про цунамі для зазначених вище небезпечних регіонів. Діяльність цих служб координує регіональна міжурядова координаційна група. Інформацію про країни-учасниці у складі Міжнародної системи попередження про цунамі розміщено на офіційному сайті МОК ЮНЕСКО [21].

Регіональні міжурядові координаційні групи

Програма з цунамі Десятиліття океану спирається на чотири регіональні міжурядові координаційні групи, які узгоджують регіональні заходи з попередження про цунамі та пом'якшення їхніх наслідків, включаючи надання інформації про цунамі національним центрам попередження про цунамі.

До складу регіональних міжурядових координаційних груп входять держави-члени МОК ЮНЕСКО, які представляють відповідний регіон у складі групи. Головною функцією цих міжурядових координаційних груп є організація та координація регіональних заходів з метою пом'якшення наслідків цунамі, включаючи моніторинг цунамі, випуск завчасних попереджень про цунамі та підготовку населення до реагування.

Кожна регіональна міжурядова координаційна група формує власні робочі та цільові групи для забезпечення конкретних технічних потреб та нарощування потенціалу у відповідному регіоні.

Представниками держав-членів у регіональних міжурядових координаційних групах є національні координатори щодо цунамі, яких призначають уряди держав для участі у координації роботи Міжнародної системи попередження про цунамі та пом'якшення їхніх наслідків [17].

Центри інформації про цунамі

Центри інформації про цунамі надають державам-членам і населенню освітню, інформаційно-просвітницьку, технічну та кадрову допомогу з питань запобігання, підготовки та пом'якшення наслідків цунамі.

Крім того, центри інформації про цунамі проводять дослідження ефективності вжитих заходів після цунамі, служать ресурсом для розроблення, публікації та розповсюдження просвітницьких матеріалів про цунамі та рекомендацій про підготовку до них, акумулюють інформацію про випадки цунамі, а також можуть сприяти оцінці ризиків і пом'якшенню наслідків.

Центри інформації про цунамі діють у кожній регіональній системі попередження про цунамі у рамках відповідних міжурядових координаційних груп.

Регіональна міжурядова координаційна група щодо системи раннього попередження про цунамі та пом'якшення їхніх наслідків у Північно-Східній Атлантиці, Середземному морі та прилеглих морях

Країнами-учасницями Регіональної міжурядової координаційної групи щодо системи раннього попередження про цунамі та пом'якшення їхніх наслідків у Північно-Східній Атлантиці, Середземному морі та прилеглих морях (далі – Регіональна міжурядова координаційна група) є (за алфавітом): Бельгія, Болгарія, Великобританія, Данія, Естонія, Єгипет, Ізраїль, Ірландія, Італія, Кабо-Верде, Кіпр, Ліван, Мальта, Монако, Нідерланди, Німеччина, Норвегія, Польща, Португалія, Румунія, Сирія, Словенія, Туреччина, ***Україна,*** Хорватія, Швеція.

Регіональна міжурядова координаційна група має офіційний сайт за посиланням: http://ioc-unesco.org/tsunami/icgmsm.html

Центр інформації про цунамі у північно-східній частині Атлантичного океану, Середземному морі та прилеглих морях

Центр інформації про цунамі в північно-східній частині Атлантичного океану, Середземномор'ї та прилеглих морях (далі – Центр) допомагає розробляти та надавати інформацію про системи попередження про цунамі, ризики та передову практику, взаємодіяти з державами-членами та широкою громадськістю країн північно-східної частини Атлантики, Середземного, Північного, Балтійського та Чорного морів. Центр базується у штаб-квартирі ЮНЕСКО у Парижі (Франція).

На згаданому офіційному сайті Регіональної міжурядової координаційної групи наведено інформацію про національні центри інформації про цунамі у країнах Чорноморського регіону.

Так, у Болгарії Національний центр інформації про цунамі включає Координаційний центр попередження про цунамі та Національний контактний орган з цунамі. Національним координатором призначено професора Атанаса Васильєва Палазова (Інститут океанології при Болгарській академії наук).

Аналогічну структуру має Національний центр інформації про цунамі у Румунії, діяльність якого координує Костянтин Іонеску (Національний інститут досліджень і розвитку фізики Землі).

До складу Національного центру інформації про цунамі у Туреччині входять: Обсерваторія Канділлі, Інститут дослідження землетрусів і Координаційний центр попередження про цунамі (Управління зі стихійними лихами та надзвичайними ситуаціями, координатор – Мусаввер Дідем Камбаз). Національним координатором є професор Ахмет Джевдет Ялчинер (Науково-дослідний центр океанічної інженерії Близькосхідного технічного університету).

Україна також входить до складу Регіональної міжурядової координаційної групи, однак на її офіційному сайті станом на жовтень 2025 року відсутня інформація про Національний центр інформації про цунамі в Україні, його координаційні та контактні органи, призначеного національного координатора з питань цунамі.

Водночас зазначимо, що відповідно до пунктів 34, 35 Положення про єдину державну систему цивільного захисту [20] в Україні здійснюють моніторинг і прогнозування надзвичайних ситуацій з метою забезпечення здійснення заходів в єдиній державній системі цивільного захисту щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій: «Для проведення моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій створюється та функціонує система моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій у порядку, визначеному Кабінетом Міністрів України». Основним нормативно-правовим документом для реалізації комплексу заходів є постанова Уряду «Про затвердження Порядку функціонування системи моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій, проведення моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій» від 17.09.2025 року № 1171.

Однак на сьогоднішній день у системі вітчизняних нормативно-правових актів з цивільного захисту (Кодексі цивільного захисту України, підпорядкованих нормативно-правових документах) взагалі відсутнє визначення поняття морської геологічної небезпеки, яке має планетарно-регіональний характер і несе транскордонну загрозу, тому потребує спеціального врегулювання.

Варто нагадати, що наукові установи Національної академії наук України брали безпосередню участь у науковому обґрунтуванні та розробленні проєкту системи раннього попередження про цунамі у Чорному морі. Зокрема, це було результатом виконання науково-дослідної роботи (далі – НДР) [18], яку у 2009 році завершив Морський гідрофізичний інститут НАН України спільно з Інститутом геологічних наук НАН України та іншими установами-співвиконавцями. У заключному звіті згаданої НДР підтверджено: «Розроблено структуру та склад системи раннього попередження про цунамі в Чорному морі як елемента Європейської системи. Розроблено комп'ютерну систему, що дозволяє оперативно прогнозувати небезпечні морські хвилі сейсмогенної природи та відтворювати можливі сценарії розвитку цунамі у Чорному морі. Створено Експериментальний Національний центр морських прогнозів, здійснюється дослідна експлуатація системи» [18, с. 137–150].

В інтересах сприяння досягненню цілей Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану необхідно продовжити вітчизняні наукові дослідження та поповнювати наукові знання про цунамі, а також превентивно впроваджувати випробувані результативні моделі соціальної поведінки при загрозі лиха. Це потребуватиме зміцнення науково-дослідного потенціалу та активізації передачі технологій.

Варто також зауважити, що крім реальної загрози підводних землетрусів та їхніх наслідків у формі цунамі у Чорному морі, теперішнє вітчизняне територіальне море (зокрема прибережне мілководдя) суттєво обтяжене наслідками воєнних дій: за попередніми оцінками Державної служби України з надзвичайних ситуацій близько 14 000 м² внутрішніх і морських українських акваторій на сьогодні забруднені вибухонебезпечними предметами [19].

У разі віднесення приморських територій до ризикових від цунамі, потенційно збільшуються негативні наслідки для громад, прибережної інфраструктури та морської біоти [1].

Тому Україні, навіть за сучасного стану, вкрай важливо налагодити та підтримувати в активному стані транскордонну співпрацю, контакти та обмін інформацією з державами Причорноморського басейну у складі Регіональної міжурядової координаційної групи; визначитися з Національним центром інформації про цунамі, контактними органами з цунамі, а також призначити національного координатора з цунамі та забезпечити їхнє стале функціонування.

Актуальним залишається питання нормативно-правового та розпорядчого забезпечення діяльності з питань цунамі. Єдина державна система цивільного захисту України [20] складається з постійно діючих функціональних і територіальних підсистем. Враховуючи реалії, що склалися в Україні, доцільно завчасно розробити та затвердити відповідні доповнення до положень про функціональні та територіальні підсистеми попередження про морські геологічні небезпеки (цунамі) єдиної державної системи цивільного захисту з урахуванням рекомендацій, наданих у Плані досліджень, розробок та впровадження здійснення Програми з цунамі в рамках Десятиліття океану.

У аналітичному резюме про цей План зазначено: «МОК ЮНЕСКО у координації з міжурядовими координаційними групами та відповідними центрами інформації про цунамі, а також у співпраці з академічними та науково-дослідними установами, підприємствами, благодійними організаціями та іншими заінтересованими сторонами здійснюватиме спільний нагляд за реалізацією Програми участі держав-членів» [17, с. 10].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Andrew Gissing. Lessons from the 2004 Indian Ocean Tsunami for the Next Generation. Режим доступу: https://www.naturalhazards.com.au/news-and-events/news-and-views/lessons-2004-indian-ocean-tsunami-still-relevant-today (дата звернення: 08.08.2025).
2. United Nations Observances. Режим доступу: https://www.un.org/en/observances (дата звернення: 08.08.2025).
3. Pacific Ocean tsunami: UNESCO's early warning system proves once again its effectiveness. Режим доступу: https://iocaribe.ioc-unesco.org/en/news-updates/pacific-ocean-tsunami-unescos-early-warning-system-proves-once-again-its-effectiveness (дата звернення: 08.08.2025).
4. Warning System and Preparedness: Outcomes of the 5th Ocean Decade Tsunami Programme Scientific Committee Meeting. UNESCO. March 2025. Режим доступу: https://www.ioc.unesco.org/en/articles/charting-future-tsunami-early-warning-system-and-preparedness-outcomes-5th-ocean-decade-tsunami (дата звернення: 09.08.2025).
5. Resolution adopted by the General Assembly on 22 December 2015 [on the report of the Second Committee (A/70/472/Add.3)] / United Nation / Режим доступу: https://docs.un.org/en/A/RES/70/203 (дата звернення: 22.08.2025).
6. Heidrun Kopp, Francesco Chiocci, Christian Berndt, M. Namık Çağatay, Teresa Ferreira, Conceição Juana Fortes, Eulàlia Gràcia, Alba Gonzalez Vega, Achim Kopf, Mathilde Bøttger Sørensen, Nabil Sultan, Isobel Yeo. Marine geohazards. Safeguarding society and the Blue Economy from a hidden threat. *European Marine Board IVZW* – Position Paper 26. Ostend I Belgium. November 2021. Режим доступу: www.marineboard.eu (дата звернення: 09.08.2025).
7. Шнюков Е.Ф., Митин Л.И., Цемко В.П. Катастрофы в Черном море. Киев: Издательская фирма «Манускрипт», 1994. 297 с.
8. Геологические исследования НИС «Киев» в Черном море (4-й рейс) / Шнюков Е.Ф., Щипцов А.А., Иванников А.В. и др. Киев: ОМГОР ЦНПМ НАНУ, 1996. 234 с.
9. Иванов В.А., Щипцов А.А. Оценка потерь волновых потоков на трение. *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.* Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. Вып. 1 (6). С. 175–179.
10. Щипцов А.А. Влияние геологических факторов на безопасность судоходства в Керченском проливе. *Геологический журнал.* 2002. № 3. С. 105–108.
11. Ahmet Yalçiner, Efim Pelinovsky, Tatiana Talipova, Andrey Kurkin, Andrey Kozelkov, Andrey Zaitsev. Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental, and numerical data. *Journal of geophysical research.* vol. 109, C12023. 2004. DOI: 10.1029/2003JC002113 Режим доступу: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2003JC002113 (дата звернення: 09.08.2025).
12. Шнюков Е.Ф., Митин М.И., Щипцов А.А. Опасное Черное море. Гос. науч. учреждение «Отд-ние мор. геологии и осадоч. рудообразования НАН Украины». Изд. 2-е, доп. Киев: Логос, 2011. 567 с.
13. Безушко Д.И., Мироненко И.Н., Мурашко А.В. Цунами черноморского побережья Украины. *Вісник Одеського національного морського університету.* 2015. № 1(43). С. 82–90.
14. Гожик П.Ф., Єремеєв В.Н., Коболев В.П, Щипцов О.А. Комплексні міждисциплінарні дослідження Азово-Чорноморського басейну: підсумки та перспективи. *Геология и полезные ископаемые Мирового океана.* 2016. № 2 (44). С. 5–15.
15. Gheorghe Oaie, Antoneta Seghedi, Vlad Radulescu. Natural marine hazards in the Black Sea and the system of their monitoring and real-time warning. *GeoEcoMar.* January 2016. Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/313091052 Natural marine hazards in the black sea and the system of their monitoring and real-time warning (дата звернення: 09.08.2025).

16. Evgeny Shnyukov, Vladimir Kobolev, Valentina Yanko. Anomalous Gas Volcanism in the Black Sea. Springer Nature. 2025. 363 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-92758-4 Режим доступу: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-92758-4 (дата звернення: 30.08.2025).
17. IOC-UNESCO (2023), Research, Development and Implementation Plan for the Ocean Decade Tsunami Programme – Executive Summary, UNESCO, Paris. (Arabic, Chinese, English, French, Russian, Spanish). (IOC Brochure 2023-4). Режим доступу: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000387779 (дата звернення: 22.08.2025).
18. Комплексні гідрофізичні і гідрохімічні дослідження морського середовища з метою сталого, екологічно та техногенно безпечного використання його ресурсного потенціалу («Океанографія»). Заключний звіт про виконання НДР / Морський гідрофізичний інститут НАН України; кер. В.О. Іванов. Севастополь, 2009. 391 с. Деп. в УкрІНТЕІ: державний реєстраційний номер: 0107U004396.
19. Щипцов О.А., Бахмутов В.Г., Поляченко Є.Б., Попов М.О., Станкевич С.А., Федосеєнков С.Г., Дугін С.С., Щипцов О.О. Концепт гібридної технології дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів на прибережному мілководді акваторій. *Український журнал дистанційного зондування Землі.* 2024. Том 11, № 4 (2024). С. 4–12. Режим доступу: https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.4.274 (дата звернення: 12.08.2025).
20. Про затвердження Положення про єдину державну систему цивільного захисту: постанова Кабінету Міністрів України від 09 січня 2014 р. № 11. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF#n10 (дата звернення: 04.09.2025).
21. Tsunami risk mitigation and early warning systems. UNESCO-IOC. Режим доступу: https://tsunami.ioc.unesco.org/en (дата звернення: 28.08.2025).
22. First-Ever Ocean Decade Tsunami Programme. *Conference Oceanographic Commission UNESCO. 2025.* Режим доступу: https://www.ioc.unesco.org/en/articles/first-ever-ocean-decade-tsunami-programme-conference (дата звернення: 03.09.2025).
23. Шнюков Є.Ф., Коболев В.П. Вогняні газові плюми під час ялтинських землетрусів 1927 року. *Геологія і корисні копалини Світового океану*. 2021. 17, № 4. С. 3–20. Режим доступу: https://doi.org/10.15407/gpimo2021/04003

Стаття надійшла до редакції 18.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 25.11.2025

REFERENCES

1. Gissing, A. (n.d.). *Lessons from the 2004 Indian Ocean tsunami for the next generation*. Natural Hazards Australia. Retrieved August 8, 2025, from https://www.naturalhazards.com.au/news-and-events/news-and-views/lessons-2004-indian-ocean-tsunami-still-relevant-today
2. United Nations. (n.d.). *United Nations observances*. Retrieved August 8, 2025, from https://www.un.org/en/observances
3. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission. (n.d.). *Pacific Ocean tsunami: UNESCO's early warning system proves once again its effectiveness*. Retrieved August 8, 2025, from https://iocaribe.ioc-unesco.org/en/news-updates/pacific-ocean-tsunami-unescos-early-warning-system-proves-once-again-its-effectiveness
4. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission. (2025, March). *Warning system and preparedness: Outcomes of the 5th Ocean Decade Tsunami Programme Scientific Committee Meeting*. Retrieved August 9, 2025, from https://www.ioc.unesco.org/en/articles/charting-future-tsunami-early-warning-system-and-preparedness-outcomes-5th-ocean-decade-tsunami

5. United Nations General Assembly. (2015). *Resolution adopted by the General Assembly on 22 December 2015 (A/RES/70/203)*. Retrieved August 22, 2025, from https://docs.un.org/en/A/RES/70/203
6. Kopp, H., Chiocci, F., Berndt, C., Çağatay, M. N., Ferreira, T., Fortes, C. J., Gràcia, E., Gonzalez Vega, A., Kopf, A., Sørensen, M. B., Sultan, N., & Yeo, I. (2021). *Marine geohazards: Safeguarding society and the Blue Economy from a hidden threat* (European Marine Board Position Paper No. 26). European Marine Board IVZW. https://www.marineboard.eu
7. Shnyukov, E. F., Mitin, L. I., & Tsemko, V. P. (1994). *Katastrofy v Chernom more* [Catastrophes in the Black Sea]. Manuscript [in Russian].
8. Shnyukov, E. F., Shchyptsov, A. A., Ivannikov, A. V., et al. (1996). *Geologicheskie issledovaniya NIS "Kyiv" v Chernom more (4-y reys)* [Geological investigations of the R/V "Kyiv" in the Black Sea (4th cruise)]. OMGOR CNSPM NAS of Ukraine [in Russian].
9. Ivanov, V. A., & Shchyptsov, A. A. (2002). *Otsenka poter volnovykh potokov na trenie* [Assessment of wave energy losses due to friction]. *Environmental Safety of Coastal and Shelf Zones and Integrated Use of Shelf Resources*, 1(6), 175–179 [in Russian].
10. Shchyptsov, A. A. (2002). *Vliyanie geologicheskikh faktorov na bezopasnost sudokhodstva v Kerchenskom prolive* [Influence of geological factors on navigation safety in the Kerch Strait]. *Geological Journal*, (3), 105–108 [in Russian].
11. Yalçiner, A., Pelinovsky, E., Talipova, T., Kurkin, A., Kozelkov, A., & Zaitsev, A. (2004). Tsunamis in the Black Sea: Comparison of the historical, instrumental, and numerical data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12), C12023. https://doi.org/10.1029/2003JC002113
12. Shnyukov, E. F., Mitin, M. I., & Shchyptsov, A. A. (2011). *Opasnoe Chernoe more* [The dangerous Black Sea] (2nd ed.). Logos [in Russian].
13. Bezusko, D. I., Myronenko, I. N., & Murashko, A. V. (2015). Tsunamis of the Black Sea coast of Ukraine. *Bulletin of the Odesa National Maritime University*, 1(43), 82–90 [in Russian].
14. Gozhik, P. F., Yeremeyev, V. N., Kobolev, V. P., & Shchyptsov, O. A. (2016). *Kompleksni mizhdystsyplinarni doslidzhennia Azovo-Chornomorskoho baseinu: pidsumky ta perspektyvy* [Integrated interdisciplinary studies of the Azov–Black Sea Basin: Results and prospects]. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 2(44), 5–15 [in Ukrainian].
15. Oaie, G., Seghedi, A., & Rădulescu, V. (2016). Natural marine hazards in the Black Sea and the system of their monitoring and real-time warning. *GeoEcoMar*. Retrieved August 9, 2025, from https://www.researchgate.net/publication/313091052
16. Shnyukov, E., Kobolev, V., & Yanko, V. (2025). *Anomalous gas volcanism in the Black Sea*. Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-92758-4
17. IOC-UNESCO. (2023). *Research, development and implementation plan for the Ocean Decade Tsunami Programme: Executive summary* (IOC Brochure 2023-4). UNESCO. Retrieved August 22, 2025, from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000387779
18. Marine Hydrophysical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine. (2009). *Kompleksni hidrofizychni i hidrokhimichni doslidzhennia morskoho seredovyshcha ("Oceanography"): Final research report* [Comprehensive hydrophysical and hydrochemical studies of the marine environment]. Sevastopol. State registration No. 0107U004396.
19. Shchyptsov, O. A., Bakhmutov, V. H., Poliachenko, Ye. B., Popov, M. O., Stankevych, S. A., Fedoseienkov, S. H., Duhin, S. S., & Shchyptsov, O. O. (2024). Concept of a hybrid technology for remote detection of explosive objects in coastal shallow waters. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 11(4), 4–12. https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.4.274 [in Ukrainian].
20. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2014). *On approval of the Regulation on the Unified State Civil Protection System (Resolution No. 11, January 9, 2014)*. Retrieved September 4, 2025, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/11-2014-%D0%BF

21. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission. (n.d.). *Tsunami risk mitigation and early warning systems*. Retrieved August 28, 2025, from https://tsunami.ioc.unesco.org/en
22. UNESCO Intergovernmental Oceanographic Commission. (2025). *First-ever Ocean Decade Tsunami Programme conference*. Retrieved September 3, 2025, from https://www.ioc.unesco.org/en/articles/first-ever-ocean-decade-tsunami-programme-conference
23. Shnyukov, Ye. F., & Kobolev, V. P. (2021). Fiery gas plumes during the Yalta earthquakes of 1927. *Geology and Mineral Resources of the World Ocean*, 17(4), 3–20. https://doi.org/10.15407/gpimo2021/04003 [in Ukrainian].

The article was received 18.08.2025 and was accepted after revision 25.11.2025

Щипцов Олександр Анатолійович
доктор географічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, головний науковий співробітник відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України», Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: Україна, 01601, м. Київ, вул. О. Гончара, 55-Б
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6285-0663 ***e-mail:*** shiptsov53@gmail.com

УДК 004.8:[008]

Oleksandr Nesterenko, Doctor of Sciences in Engineering, Professor, Head of the Department of Information Technologies
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5329-889X ***e-mail:*** oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Petro Yatsuk, Candidate of Sciences in Engineering, Associate Professor of the Department of Information Technologies
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-7124-4849 ***e-mail:*** petr.yatsuk73@gmail.com

International European University, Kyiv, Ukraine

AI (NOT) AGAINST AI

Abstract. *The aim of the research is to identify information, technological and methodological approaches to artificial intelligence developing in modern conditions of digital transformation, and in the long term. The objectives of the research are the following questions: a) to conduct a systematic analysis of the main aspects of AI development, in particular by the category of AI security; b) to identify the main time trends in AI improvement and ensuring AI security; c) to assess the current state of AI, development directions in this area and solving problems of ensuring AI security. Given the specifics of the research topic, tools in the form of modern AI means, such as ChatGPT, Claude, Copilot, Gemini, were used to conduct the research. As criteria for assessing the validity of conclusions, it is proposed to rely on the relevance and pertinence of the results of AI means' responses to various prompts. The main topic of inquiries is devoted to key trends that characterize the development of artificial intelligence, how AI will develop in the near future and until 2100, and what consequences this will have for humanity. The main stages of AI development have been identified in accordance with the above predictions. The main results show that the above-mentioned AI means primarily indicate an increase in attention to the ethical and legal aspects of using AI, as well as the growing AI integration into various areas of human activity. At the same time, it was noted that it is important to maintain a balance between using AI to enhance human capabilities and ensuring that people do not lose their intellectual skills. Particular attention is paid to the possible moment of singularity, when AI will begin to develop at an exponential rate, which will lead to radical changes in society and technology, and the consequences of this process are difficult to predict with certainty. Such systematic reviews are suitable for the formation of information meta-resources, which can be used by responsible persons as well as directly by specialists in various fields to support decision-making regarding the formation of AI security tools.*
Keywords*: information technologies, digital transformation, future, security, threats.*

О.В. Нестеренко, П.П. Яцук

Міжнародний європейський університет, м. Київ, Україна

ШІ (НЕ) ПРОТИ ШІ

Анотація. *Метою дослідження є визначення інформаційно-технологічних та методологічних шляхів розвитку штучного інтелекту в сучасних умовах цифрової трансформації і на віддалену перспективу. Завданнями дослідження є наступні питання: а) провести систематизований аналіз основних аспектів розвитку ШІ, зокрема за категорією безпеки ШІ; б) визначити основні часові*

© О.В. Нестеренко, П.П. Яцук, 2025

тренди вдосконалення ШІ та забезпечення безпеки ШІ; в) здійснити оцінювання сучасного стану ШІ, напрямів розвію в цій сфері і вирішення проблем забезпечування безпеки ШІ. Зважаючи на специфіку теми дослідження, для проведення розвідок залучено інструментарій у вигляді сучасних засобів ШІ, як-то ChatGPT, Claude, Copilot, Gemini. У якості критеріїв оцінювання обґрунтованості висновків пропонується спиратися на релевантність та пертинентність результатів відповідей засобів ШІ за різними запитами. Чільна тематика запитів присвячена ключовим тенденціям, якими характеризується розвиток штучного інтелекту, як розвиватиметься ШІ у найближчому майбутньому і до 2100 року та які наслідки це матиме для людства. Визначено основні етапи розвитку ШІ у відповідності до наведених прогнозів. Основні результати свідчать, що зазначені засоби ШІ у першу чергу вказують на зростання уваги до етичних та правових аспектів використання ШІ, а також щодо зростаючої інтеграції ШІ в різні галузі людської діяльності. В той же час зазначалось, що важливо зберігати баланс між використанням ШІ для підвищення людських можливостей та забезпеченням того, щоб люди не втрачали своїх інтелектуальних навичок. Особливо звертається увага на можливий момент сингулярности, коли ШІ почне розвиватися з експоненційною швидкістю, що призведе до радикальних змін у суспільстві та технологіях, а наслідки цього процесу важко передбачити однозначно. Подібні систематичні огляди придатні для формування інформаційних мета-ресурсів, які доцільно використовувати відповідальними особами, а також безпосередньо фахівцями різних галузей для підтримки прийняття рішень щодо формування засобів безпеки ШІ.

Ключові слова: *інформаційні технології, цифрова трансформація, майбутнє, безпека, загрози.*

https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.134-153

«У минулому небезпека полягала в тому, що люди ставали рабами. Небезпека майбутнього в тому, що люди можуть стати роботами»
Еріх Фромм (Erich Fromm), 1955.

«Я думаю, що наш розум – це програма, тоді як мозок – аналог комп'ютера. Теоретично можливо скопіювати вміст мозку на комп'ютер ... Сьогодні, проте, це не в наших силах»
Стівен Хокінг (Stephen Hawking), 2018.

Вступ

Пройшло вже більш ніж півстоліття з появи терміну «штучний інтелект» та зародження нової науки. Не можна сказати, що цей термін є вдалим, адже дві складові – «штучний» і «інтелект», взагалі кажучи, принаймні на сьогодення, протилежні один одному. Тим не менш він виявився життєздатним і увійшов у широкий обіг. Більше того, 2023 року один із найстаріших словників англійської мови Collins визнав абревіатуру AI словом року. Якщо озирнутися і згадати ті надії і обіцянки, які звучали на початку шляху, оцінити, що сталося насправді, можна побачити, що за цей період галузь «штучний інтелект»

декілька разів проходила через зміну основних підходів і парадигм, які визначали саму мету її розвитку. Водночас з того часу й досі вчені, фахівці та й пересічні люди поділені на два табори – на тих, що вірять в можливість створення штучного інтелекту, й тих, хто піддає цю можливість нищівній критиці.

Перше, що спадає на думку звичайної людини, яка чує про штучний інтелект, це те, що робиться спроба створити «штучний мозок» – щось на зразок штучної нирки або штучної руки. Тобто вважається, що основні зусилля спрямовані на створення технічного пристрою, здатного замінити інтелект людини. Одні вважають, що ця думка є глибоко помилковою, хоча б тому, що ми, на жаль, дуже мало знаємо про те, що таке інтелект насправді. З іншого боку, зважаючи на розвиток технологій, чимало експертів сходяться на думці, що глобальних і принципово нерозв'язних проблем для створення ШІ на сьогодні немає.

Існує й ще одна дилема, пов'язана зі штучним інтелектом. Прихильники технологій бачать у розвитку ШІ значний вплив на розвиток бізнесу та вдосконалення управління, подальше позбавлення людей від багатьох рутинних операцій, зокрема з обліку і розрахунків, пошуку і зберігання інформації, роботи з документами, підтримки ухвалення рішень тощо. Поборники інших поглядів вважають, що вдосконалення ШІ несе низку загроз, осібно ризики того, що машини почнуть приймати власні рішення без відома людини. Також існує й інша небезпека, яка полягає у тому, що люди поступово припинять думати самі, адже високі технології замінять людині її копітку розумову працю. І це, напевне, позначиться на інтелекті подальших поколінь і навіть призведе до повної деградації людства.

Не можна до того ж не відмітити, що подальше широкомасштабне використання інформаційно-комунікаційних технологій у всіх сферах діяльності призводить не лише до постійного підвищення ефективності задоволення інформаційних потреб суспільства та створення передумов переходу цивілізації до нових щаблів у розвитку, а й до зростання кількості кіберінцидентів і якості вирішення завдань, що стоять перед кіберзлочинцями, тобто до зростання ступеня уразливості людей й організацій в кіберпросторі і заподіяної шкоди. Адже можливості зловмисників напряму пов'язані з інтелектуалізацією технологій і практичним застосуванням засобів штучного інтелекту.

Постановка завдання

Таким чином, людство уперше у своїй історії зіштовхнулось з ситуацією, коли виникає перспектива появи істот, розумніших за «царя природи». Неоднозначність нової технології призвела до усвідомлення важливості формування умов забезпечення безпеки штучного інтелекту (AI Safety), започаткування державного та глобального управління в цій сфері, її нормативно-правової та технологічної підтримки. Фактично в сучасних умовах почалось руйнування «нульової гіпотези», згідно з якою співвідношення можливостей і ризиків штучного інтелекту можна й надалі ігнорувати.

Поштовхом до цих зрушень, безумовно, стали численні публікації науковців та ЗМІ стосовно ближчого і дальнього майбутнього штучного інтелекту, кількість яких постійно зростає. З появою поняття «надінтелекту» (Superintelligence) сформувались погляди щодо того, що розвиток надрозумних машин, якщо ним не керувати належним чином, може призвести до катастрофічних ризиків для людства, які в майбутньому тільки загостряться через невблаганну швидкість, з якою вдосконалюються технології, змінюються інструменти, ідеї та механізми реалізації штучного інтелекту.

Таким чином, в межах загальної проблеми розвитку ШІ, пов'язаного з прогресом у застосуваннях ІКТ та іншими чинниками, актуальною є задача проведення досліджень, що мають відображати суспільно-технологічні тренди у вказаному напрямку. На їх основі стає можливим не лише створити умови для забезпечення ефективного управління безпекою ШІ, а й для вибору та застосування новітніх технологічних засобів її підтримки. Зважаючи на сучасний рівень розвитку ШІ, зокрема генеративних моделей, вбачається за можливе долучити до проведення таких досліджень найкращих представників штучної раси як додаткового інструменту опрацювання інформаційних джерел.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

До питань створення ШІ увага фахівців і вчених почала привертатись вже тоді, коли персональні комп'ютери ще не набули широкого ужитку, а розвиток інформаційних технологій лише починав свій помітний поступ. Як відомо, термін «штучний інтелект» з'явився у професійних колах 1956 року, коли його почали обговорювати американські вчені на науковій конференції у Дартмутському коледжі (Dartmouth College). Але ще за рік до цього відомі вчені Дж. Маккарті, М. Л. Мінскі, Н. Рочестер та К. Е. Шеннон сформували відповідні пропозиції до цієї конференції, в назві яких вже було вжито словосполучення «study of articial intelligence». Вихідним посилом авторів було твердження, що кожен аспект навчання або будь-яка інша особливість інтелекту в принципі можуть бути настільки точно описаними, що може бути створена машина для їх імітації [1].

Одні з перших наукових публікацій, присвячених питанням штучного інтелекту, за даними Scopus, з'явились ще 1960 року. У Web of Science Core Collection перші публікації індексовані 1970 року. З тих часів кількість публікацій невпинно зростає і на сьогодні разом за даними Scopus і Web of Science складає більше 800 тис. документів. Значна частина робіт висвітлює дослідження щодо розробки застосувань ШІ та їх використання в різних галузях (тобто так званий підхід AI First (ШІ в пріоритеті)). Зазначається, що інновації ІТ, такі як модеруючий фактор культури управління, керованої даними й, звісно, ефективна інтеграція штучного інтелекту можуть бути адаптовані для досягнення стійкості бізнесу у сучасному турбулентному середовищі. Саме можливості ШІ знаменують собою зеніт цього трансформаційного процесу, відкриваючи генезис і капітальний перегляд організаційних процедур в бізнесі [2].

Але вже з самого початку сформувалась низка публікацій, в яких було заявлене відкритим питання, чи можна запрограмувати комп'ютери на творчі міркування. Наприклад, одна з робіт аналізує це питання в юридичній сфері [3].

В роботі [4] розглядається перспектива розвитку науки про ШІ з негативної точки зору, критикуючи деякі з популярних прогнозів майбутнього. Автор ґрунтується на спостереженні того, що комп'ютер за своєю суттю є дуалістична сутність, фізичні налаштування якої розроблені таким чином, щоб сприяти його логічній установці (програмі), яка виконує обчислення. Мозок інший. При емпіричному аналізі на кількох різних рівнях (клітинному, молекулярному) виявляється, що немає задовільного способу відокремити логічну модель мозку (або алгоритм) з фізичного субстрату його реалізації. Змушений емпіризмом у моністичну перспективу, мозок-розум виглядає не втіленим у фізичній реальності чи вбудованим у неї, а скоріше ідентичним фізичній реальності.

Інша, більш потужна серія публікацій, що почалась з 2010-х, підіймає питання щодо найважливішої проблеми XXI століття – технологічної сингулярності, моменту, коли штучний інтелект досягне інтелекту на рівні людини і матиме механізми виживання, подібні до наших. У Post-AI World (світі після ШІ) ми можемо бути змушеними змагатися з суперником, хитрішим, могутнішим і чужішим, ніж можна собі уявити [5-7]. У статті [8] розглядаються думки відомих вчених з різних галузей науки щодо небезпеки створення штучного інтелекту для людства у майбутньому. При цьому акцентовано увагу на відсутності підходів до створення системи контролю, насамперед етичного характеру, над штучним інтелектом (етика ШІ (AI Ethics) – це правила та принципи для створення та використання ШІ, які не шкодять людям). Значною подією у напрямку розгляду можливих наслідків створення штучного надінтелекту став вихід книги філософа Ніка Бострома [9]. Це видання на той час було визнане однією з книжок року. Основним посилом автора є екзистенційний ризик, пов'язаний з високою ймовірністю виходу з-під контролю штучного надінтелекту як системи, здатної до самовдосконалення та досягнення проміжних цілей. Водночас Бостромом розглядаються й варіанти, при яких надінтелект буде працювати на благо людства. Робиться висновок, що для запобігання екзистенційній катастрофі має бути вирішена проблема узгодження штучного інтелекту шляхом впровадження у надрозумну систему цілей, сумісних з виживанням та благополуччям людства. Однак виявляється, що вирішити цю проблему напрочуд складно. Автори більш сучасного видання [10], що походять з багатьох різних галузей знань і країн світу, роблять значний внесок у вирішення проблеми штучного інтелекту з політичної точки зору, пропонуючи для політиків, науковців і суспільства в цілому основи глобальної політики вирішення питань, пов'язаних з розробкою та використанням ШІ. Як наслідок, упродовж 2023-2024 років відбулось вже два міжнародні саміти із проблем штучного інтелекту. На них високі представники країн обговорювали вплив ШІ на суспільство та довкілля, а також заходи, які мають вжити держави, щоб скористатися перевагою технології та запобігти ризикам.

Як би там не було, але ризики застосування ШІ ми починаємо відчувати вже сьогодні – і цьому присвячена ще одна множина публікацій, яка стає усе популярнішою. Якщо спочатку передбачити негативні наслідки застосування засобів ШІ, зокрема в бізнесі і управлінні, було не просто, то подальший стрімкий розвиток технологій кардинально змінив погляди багатьох фахівців і вчених. У першу чергу йдеться про те, що бізнесові структури, особливо малого і середнього бізнесу, все ще не готові до таких технологій. Вони мають

подолати відчутні труднощі, пов'язані зі створенням ІТ-інфраструктури, здатної підтримувати впровадження нових технологій, не лише таких як аналітика, великі дані та Інтернет речей, а й штучний інтелект [11, 12]. Дослідження свідчать, що значно відстає й підтримка розумової діяльності осіб, що приймають рішення. Розвинуті системи бізнес-аналітики від світових брендів, що пропонуються навіть для МСП, потребують відчутних капіталовкладень. Ще однією з проблем є інформаційне перевантаження, заподіяне експоненціальним зростанням цифрової інформації, що відгукується у неправильному прийнятті управлінських рішень, зниженні продуктивності працівників та когнітивному тиску на них [13].

Подальший розвиток подій, пов'язаних з цифровізацією та імплементацією засобів ШІ, спричиняє привертання усе більшої уваги фахівців і користувачів й до захисту конфіденційності та безпеки, можливости порушення приватности людини в Інтернеті, спотворення інформації [14]. Особливо це стосується, наприклад, прогресу в поширенні нових технологій в сфері адміністративного управління [15, 16]. Викликає деяке занепокоєння питання стосовно, приміром, прийняття прогностичних рішень, які не є новиною для адміністративного права і передбачають необхідність ретельної оцінки ризику. Проте залишається сумнівним, наскільки адміністрація має довіряти такі процедури ймовірнісного аналізу ризиків додаткам ШІ і наскільки це може бути юридично прийнятним [17]. Також в роботі [18] наводиться великий огляд літератури щодо імплементації ШІ в інтерактивному маркетингу і визначаються потенційні проблеми «темної сторони» ШІ, що стосуються трьох сфер: індивідуальних споживачів, суспільства та права. Технології штучного інтелекту обіцяють трансформувати й навчальні процеси, роблячи їх більш доступними, ефективними та інноваційними [19]. Однак із застосуванням ШІ в освіті залишаються ризики, пов'язані з проблемами безпечного та ефективного використання цих технологій [20].

Технологічні досягнення перших двох десятиліть нашого століття змусили світ заговорити про інформаційну безпеку, а згодом й про кібербезпеку застосування штучного інтелекту. Одним із прикладів передової технології, яка відкриває нові можливості для забезпечення зв'язку людина-машина, є інтерфейси мозок-комп'ютер (Brain-Computer Interfaces). Утім такі новітні комунікаційні комп'ютерні інтерфейси, що базуються на ШІ, не лише породжують питання етики, розкриття особистих думок і почуттів, а й конфіденційності та безпеки, несуть ризик витоків конфіденційної інформації [21]. Особливо це стосується, наприклад, прогресу в поширенні Інтернету речей (IoT), де з проблемами конфіденційності стикаються різні рівні IoT, починаючи з дефектів мікропрограмного забезпечення й до застосування машинного навчання [22]. В статті [23] аналізуються ризики впливу застосування ШІ на виконання завдань забезпечення інформаційної безпеки та кібербезпеки як невід'ємних складових національної безпеки. Визначено, що розвиток ШІ викликав питання щодо його безпечності та наслідків використання на об'єктах критичної інфраструктури, складності верифікації створених цими засобами інформаційних ресурсів та рішень. Загрози небезпечного впливу результатів їхнього функціонування на безпеку людини, суспільства та держави призводить до виникнення значних ризиків.

Отже, чи варто турбуватися про сьогоденні і довгострокові ризики від ШІ? Якщо так, то що ми можемо з цим робити? В теорії захисту інформації доведено, що у класі відкритих систем абсолютного захисту (гарантованого захисту) бути не може. Загрози всілякого роду (катастрофи, катаклізми, особова небезпека) у нашому світі завжди були, є і будуть. Завдання ж полягає у тому, щоб максимально наблизитись до їх запобігання. Тому у колах фахівців з комп'ютерної безпеки частіше йдеться не про захищені системи, а про надійні системи (trusted systems). Це системи, які мають офіційно встановлені вимоги до безпеки та дотримуються цих вимог. В основі кожної такої системи є високонадійна обчислювальна база (Trusted Computing Base), що складається з засобів, необхідних для примусового виконання та моніторингу всіх вимог безпеки [24]. Якщо така база працює у відповідності до технічних умов забезпечення безпеки, можна казати про системи, яким можна довіряти за жодних несприятливих обставин [25, 26]. Щось подібне запропоноване в роботі [27], де автор обґрунтовує принцип доведено корисного штучного інтелекту. У якості критерію доведеності використовується вимога створювати системи ШІ, орієнтовані не на довільні цілі, а будувати системи, які виключно передбачають слідування загальнолюдським цілям і корисності для людей. Вважається, що це убезпечить нас, зокрема від майбутніх надрозумних машин, за умови, що всі розробники ШІ у всьому світі будуть дотримуватись цього принципу. Названі кроки, убачаючи їхню важливість, потребують створення та вдосконалення світової нормативно-правової та організаційної бази безпеки ШІ та зваженого поступу у технологічному розвитку.

Таким чином, науково-методичні засади подальшого розвитку в сфері безпеки ШІ потребують подальших досліджень в контексті пріоритетів сучасних технологічних трендів, соціології та права. Концептуальний базис дослідження цих питань прогресує, а особливості технологічного середовища постійно набувають різноманіття. Тому актуальність завдання полягає у врахуванні цих процесів у наукових та методологічних принципах проєктування та розробки ефективних засобів ШІ, забезпечення їх більш безпечного використання в усіх сферах діяльності сьогодні і з погляду на майбутнє. Зважаючи на сучасний рівень розвитку ШІ, особливо генеративних моделей, стає можливим долучити до таких досліджень й кращих представників цієї «популяції».

Мета дослідження

Метою дослідження є визначення інформаційно-технологічних та методологічних шляхів розвитку штучного інтелекту в сучасних умовах цифрової трансформації і на віддалену перспективу. Для цього вирішуються такі завдання дослідження:

а) провести систематизований аналіз основних аспектів розвитку ШІ, зокрема за категорією безпеки ШІ, використовуючи як інструментарій сучасні засоби ШІ;

б) визначити основні часові тренди вдосконалення ШІ та забезпечення безпеки ШІ;

в) здійснити оцінювання сучасного стану ШІ, напрямів розвію в цій сфері і вирішення проблем забезпечування безпеки ШІ.

Методика дослідження

За більш ніж піввікову історію розвитку сфери штучного інтелекту в багатьох публікаціях наведена різнопланова панорама тем, що охоплюють соціальні, політичні та технологічні наслідки розвитку ШІ, зокрема щодо забезпечення безпеки ШІ. За ці часи вказана сфера як досить нова соціальна, інженерна та наукова дисципліна істотно змінювалася, однак вона зберегла свої основні тренди і продовжує стрімко розвиватися та вдосконалюватись.

У цьому зв'язку корисні знання для теорії і практики можуть надавати систематизовані огляди (systematic review) інформаційних джерел шляхом укрупнення та синтезу емпіричних досліджень. На основі досвіду та за рекомендаціями різних дослідників, наприклад, [28], такі дослідження мають включати як мінімум три основні етапи: планування (planning), виконання (conducting) та звітування (reporting). На етапі планування необхідно визначити дослідницькі питання щодо відображення (research questions), пов'язані з конкретною темою, зокрема визначення компонентів та критеріїв прийнятності. На етапі виконання треба визначити комплексну стратегію системного пошуку кандидатів дослідження та виконати її. На третьому етапі з отриманого корпусу слід витягти необхідні дані, провести інтерпретацію та презентацію результатів, а також виконати оцінювання обґрунтованості висновків. Зважаючи на специфіку теми дослідження, пропонується залучити для проведення розвідок інструментарій у вигляді сучасних засобів ШІ, як-то ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot. У якості критеріїв прийнятності пропонується спиратися на релевантність та пертинентність результатів відповідей засобів ШІ за різними запитами.

Отже, дослідницькі питання є відправним пунктом систематизованого огляду, оскільки на їх основі визначаються напрями дослідження. Дане дослідження спирається на такі дослідницькі питання (ДП):

ДП1: Якими ключовими тенденціями характеризувався розвиток штучного інтелекту?

ДП2: Як розвиватиметься ШІ у найближчому майбутньому і які наслідки це матиме для людства?

ДП3: Чи спостерігаються тенденції негативного ставлення у суспільстві до розвитку ШІ?

ДП4: Чи спостерігаються небезпечні явища у зв'язку із розвитком ШІ?

ДП5: Чи є неминучим ризик втрати людьми своїх інтелектуальних здібностей з-за прискорення розвитку ШІ?

ДП6: Що треба робити людству, щоб запобігти ризикам негативних та катастрофічних наслідків розвитку ШІ?

ДП7: Які можливі етапи розвитку ШІ до 2100 року?

Такий огляд високого рівня первинних досліджень з цілеспрямованого питання визначає, відбирає, синтезує та оцінює всі високоякісні докази дослідження, що мають відношення до поставленого питання. Оскільки інформаційні технології та засоби забезпечення безпеки трансформуються та розвиваються дуже швидко, необхідно постійно відтворювати такі дослідження, щоб оцінити, як ці зміни впливають на сучасні погляди та існуючі розриви між практикою та суспільними очікуваннями.

Результати дослідження

Реалізацію запропонованої методології розпочато з загального запиту «Якими ключовими тенденціями характеризувався розвиток штучного інтелекту (ШІ) упродовж останніх років». З отриманих результатів, представлених у табл. 1, видно, що усі респонденти вказали у першу чергу на зростання уваги до етичних та правових аспектів використання ШІ, зокрема таких як упередженість алгоритмів, вплив на ринок праці та відповідальність за рішення, прийняті ШІ. Друга тенденція – це інтеграція ШІ в різні галузі (три відповіді), такі як охорона здоров'я (діагностика, розробка ліків), агросектор, енергетика, фінанси (аналіз ринків, виявлення шахрайства), освіта та персоналізоване навчання та інші сфери, що сприяло підвищенню ефективності та якості послуг. Необхідно відмітити, що Copilot додав ще й джерела, якими він користувався для формування відповіді.

Таблиця 1. Характеристика відповідей на запит «Якими ключовими тенденціями характеризувався розвиток штучного інтелекту (ШІ) упродовж останніх років»

Категорія відповідей	ChatGPT	Claude	Gemini	Copilot
Зростання генеративного ШІ	+		+	+
Розвиток мультимодальних моделей	+	+		+
Розвиток великих мовних моделей (LLM)		+	+	
Відкриті моделі				+
Оптимізація моделей				+
Віртуальні агенти				+
Інтеграція ШІ в різні галузі	+	+	+	
Етичні та правові аспекти використання ШІ	+	+	+	+
Регуляторні зміни		+	+	
Демократизація технологій ШІ (більш масовий доступ)		+	+	
Активний розвиток ШІ в Україні	+			

Джерело: розробка автора за даними ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot.

Другий запит стосувався питання можливих тенденцій розвитку ШІ у найближчому майбутньому і які наслідки це матиме для людства (табл. 2). Перспективними визначено автономні персональні помічники (ШІ-асистенти) та пов’язане із цим розширення можливостей природної мови, тобто ШІ зможе вести більш природні та складні діалоги, розуміти контекст і нюанси людської мови. Серед позитивних наслідків головним є прискорення інновацій та наукових досліджень, а серед негативних – навантаження на суспільство щодо виникнення нових етичних питань, пов’язаних з застосуванням ШІ. Третій запит торкався питання виявлення тенденцій негативного ставлення до розвитку ШІ за останній час (табл. 3).

Таблиця 2. Характеристика відповідей на запит «Спробуй передбачити, як розвиватиметься штучний інтелект у найближчому майбутньому і які наслідки це матиме для людства»

Категорія відповідей	ChatGPT	Claude	Gemini	Copilot
Тенденції розвитку				
Автономні персональні помічники	+	+		
Мультимодальні моделі		+		
Розширення можливостей природної мови			+	+
Розвиток емоційного інтелекту			+	
Злиття біологічного та штучного інтелекту			+	
Підвищена автономія роботів				+
Позитивні наслідки				
Прискорення інновацій та наукових досліджень	+	+	+	
Автоматизація рутинних завдань			+	+
Стане доступнішим персоналізоване навчання		+		+
Покращення медичної допомоги				+
Розв'язання глобальних проблем			+	
Покращення якості життя	+		+	
Негативні наслідки				
Рішення ШІ буде важко передбачити чи контролювати	+			
Втрата робочих місць і масове безробіття			+	
Збільшення соціальної нерівності			+	
Загроза безпеці і втрата приватности			+	
Виникнення нових етичних питань		+		+

Джерело: розробка автора за даними ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot.

Таблиця 3. Характеристика відповідей на запит «Чи спостерігаються останнім часом тенденції негативного ставлення до розвитку ШІ»

Категорія відповідей	ChatGPT	Claude	Gemini	Copilot
Побоювання щодо втрати робочих місць	+	+	+	
Етичні занепокоєння		+	+	+
Соціальні упередження	+	+		+
Небезпека дезінформації	+	+		
Занепокоєність відсутністю регулювання	+		+	
Питання безпеки та кібербезпеки		+		+
Технологічні ризики		+	+	
Екологічний вплив	+			
Філософські та екзистенційні страхи	+			

Джерело: розробка автора за даними ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot.

У цьому випадку на «думку» штучних експертів основними побоюваннями є втрата робочих місць, етичні занепокоєння та соціальні упередження. Стосовно втрати робочих місць чатами відмічається, що автоматизація на основі ШІ може замінити людську працю у багатьох галузях, особливо це стосується професій, пов'язаних із рутинними або творчими завданнями (наприклад, копірайтинг, художники, письменники, дизайнери). Етичні занепокоєння в основному пов’язані з використанням необ’єктивних даних, особливо в контексті рішень, що впливають на життя людей (судочинство, кредити, робота), збереження приватности, можливість використання ШІ для маніпуляцій. З цим пов’язані й соціальні упередження – занепокоєння щодо впливу ШІ на розвиток дітей та освіту, щодо зменшення людської взаємодії, поглиблення соціальної нерівності, а також створення відчуття невизначеності та страху перед невідомим.

Наступний – четвертий запит «Чи спостерігаються небезпечні явища у зв’язку із розвитком ШІ» – продемонстрував ще існуючу слабкість моделей реагувати на нюанси і логіку людського спілкування (попереднє питання – чого ми боїмося, а цей запит, власне, чи наші страхи вже збуваються). Більшість відповідей повторювали реакцію на попередній запит, зокрема з використанням слів «може», «потенційно», «ризик». А, може, ШІ вже щось приховує?

П’ятий запит «Чи є неминучим ризик втрати людьми своїх інтелектуальних здібностей з-за того, що можливості ШІ значно перевищать людські» ще більш насторожив опитуваних. Усі моделі одностайно і дещо заплутано зауважили, що це важливе філософське питання, яке потребує зваженого аналізу, однак цей ризик не є неминучим, але він можливий за певних умов. Зазначалось, що важливо зберігати баланс між використанням ШІ для підвищення людських можливостей та забезпеченням того, щоб люди не втрачали своїх інтелектуальних навичок. Інвестування в освіту та навчання може допомогти людям адаптуватися до змін, які приносить розвиток ШІ. За відповідального підходу ШІ може навіть сприяти розвитку людського інтелекту, відкриваючи нові можливості для навчання та самовдосконалення. Ключовим є створення культури, де технології доповнюють людину, а не замінюють її.

Результати реакції ШІ на шостий запит «Що треба робити людству, щоб запобігти ризикам негативних та катастрофічних наслідків розвитку ШІ та майбутнього суперінтелекту» представлені у табл. 4.

З цих результатів видно, що усі респонденти одностайно вказали у першу чергу на необхідність розробки етичних стандартів, які передбачають створення етичних принципів та їх дотримання для розробки та використання ШІ, що забезпечить його безпечне та відповідальне застосування. На другому місці за кількістю відданих «голосів» знаходяться чотири напрямки. У першу чергу, це освіта та підвищення обізнаності, що передбачає підготовку фахівців, навчання нових поколінь інженерів, науковців та політиків етичним та безпечним практикам у сфері ШІ, а також інформування суспільства про потенційні ризики та переваги ШІ. Дослідження та розвиток безпеки ШІ мають бути підтримані інвестиціями, спрямованими на вивчення та запобігання ризикам, пов’язаним із ШІ та суперінтелектом, а також моделювання ризиків та сценаріїв можливих загроз для кращого розуміння та підготовки до потенційних викликів. Глобальна

координація припускає створення міжнародних організацій з управління розвитком ШІ та спільне фінансування досліджень безпеки ШІ. Нарешті, підготовка до непередбачених ситуацій має полягати у розробці різних сценаріїв розвитку подій, пов'язаних з розвитком ШІ, та створенні систем раннього попередження про потенційні загрози.

Таблиця 4. Характеристика відповідей на запит «Що треба робити людству, щоб запобігти ризикам негативних та катастрофічних наслідків розвитку ШІ та майбутнього суперінтелекту»

Категорія відповідей	ChatGPT	Claude	Gemini	Copilot
Розробка етичних стандартів	+	+	+	+
Безпека та контроль розвитку ШІ		+	+	
Транспарентність та підзвітність		+		
Технічні заходи безпеки	+	+		
Контроль над даними				+
Регулювання та політика	+			+
Освіта та підвищення обізнаності	+	+		+
Дослідження та розвиток безпеки ШІ	+		+	+
Міждисциплінарна співпраця		+		
Глобальна координація		+	+	+
Врахування людських цінностей		+		
Співпраця з громадськістю	+		+	
Підготовка до непередбачених ситуацій	+		+	+

Джерело: розробка автора за даними ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot.

Результати опитування за сьомим запитом «Опишіть можливі етапи розвитку ШІ до 2100 року» показані на рис. 1.

Хоча, як видно з рис. 1, часові проміжки передбачень різними застосуваннями коливаються – від обережних від ChatGPT до екстремальних від Gemini, наведені прогнози умовно можна поділити на чотири етапи: сучасний період (2020-2030 роки), розвиток загального інтелекту та поява ознак суперінтелекту (2030-2050 роки), розвиток суперінтелекту (2050-2070 роки) та постінтелектуальна ера (2070-2100 роки).

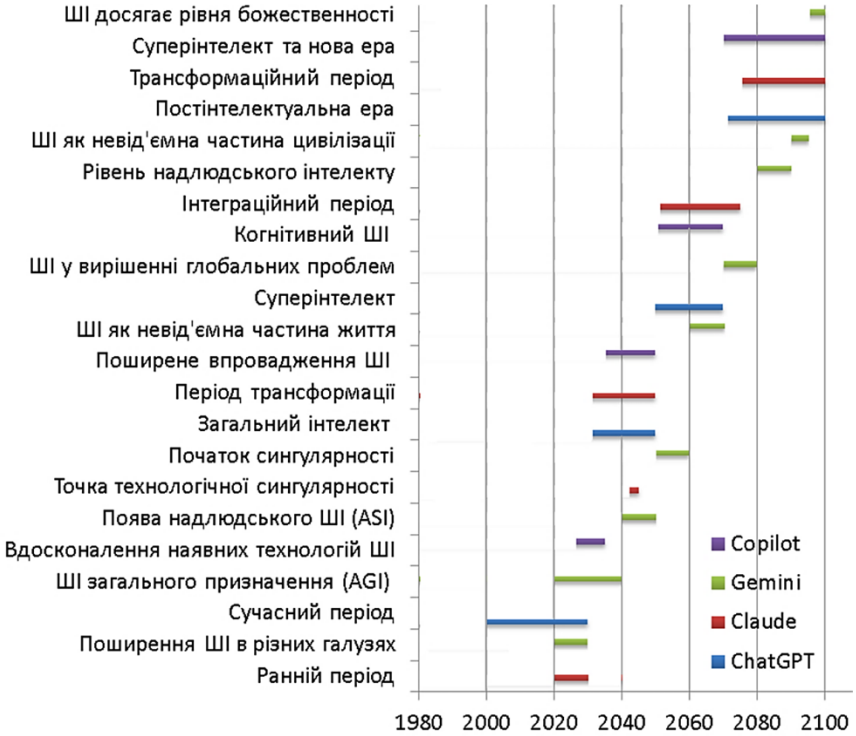


Рис. 1. Можливі етапи розвитку ШІ до 2100 року
Джерело: розробка автора за даними ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot

Сучасний період в основному характеризується розвитком вузького, або слабкого штучного інтелекту (Narrow Artificial Intelligence, ANI), тобто такого, алгоритми якого виконують конкретні завдання та не можуть здійснювати інтелектуальні дії. Цей розвиток полягає у вдосконаленні генеративних моделей та супроводжується впровадженням ШІ у багатьох сферах, в особливості в медицині та діагностиці. В суспільстві розгортаються активні дискусії щодо етики ШІ та впровадження перших міжнародних стандартів регулювання.

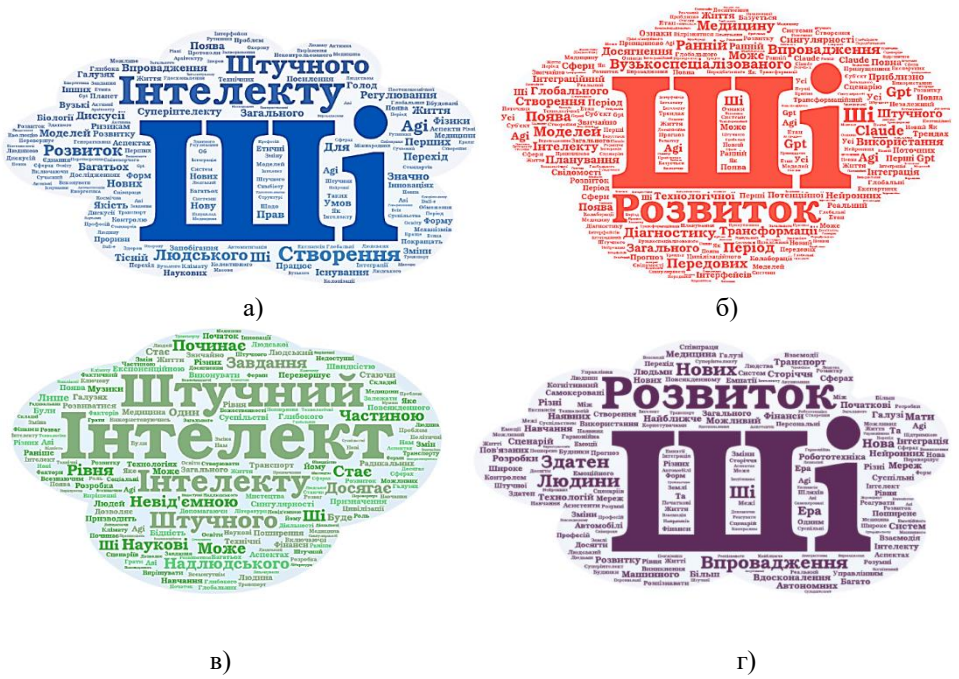
Другий етап позначається появою загального штучного інтелекту (Artificial General Intelligence, AGI), здатного виконувати будь-яке завдання на рівні або краще за людину і спроможного до автономного навчання. Це призведе до активної співпраці між AGI та людством у наукових дослідженнях і технічних інноваціях. Водночас передбачається посилення регулювання для запобігання ризикам неконтрольованого розвитку AGI.

Третій етап є визначальним, адже він пов’язаний з переходом до штучного суперінтелекту (Artificial Super Intelligence, ASI), що перевершує людський інтелект у всіх аспектах, та подальшим його розвитком. Людство створює механізми контролю, такі, наприклад, як «вбудовані обмеження». В суспільстві поширюються дискусії щодо об’єднання людського і штучного інтелекту (наприклад, через нейронні інтерфейси). Однак на цей час припадає й момент сингулярності, коли штучний інтелект починає розвиватися з експоненційною швидкістю, що призводить до радикальних змін у суспільстві та технологіях і наслідки цього процесу важко передбачити однозначно.

Постінтелектуальна ера вбачається апофеозом розвитку цивілізації. Відбувається глибока інтеграція ШІ в усі аспекти людського існування, реалізується створення «колективного інтелекту» як симбіозу людських і штучних систем. Це надає можливість космічної експансії з використанням ШІ для колонізації інших планет. Людське життя перетворюється в нову форму через біотехнології та інтелектуальну еволюцію. Штучний інтелект досягає рівня божественності, стаючи всемогутнім і всезнаючим. Ведуться етичні дискусії щодо прав ШІ та нових форм існування (однак моделі не уточнюють, хто (або що) провадить такі дискусії).

В цілому моделі одностайно зазначають, що це лише один з можливих сценаріїв розвитку ШІ і людства. Фактичний розвиток буде залежати від багатьох чинників, включаючи наукові досягнення, технологічні інновації та соціальні та політичні фактори. Водночас, що необхідно відмітити, всі моделі у своїх передбаченнях уникнули негативних аспектів піднесення ШІ, рівно як й якихось апокаліптичних сценаріїв розвитку.

На рис. 2 наведені «хмари слів» (також відомі як хмари тегів або колаж слів) відповідей моделей на вищезазначений запит. Такі хмари – це візуальне представлення тексту, яке надає більшого рангу словам, що з'являються частіше. З цих візуалізацій витікає, що словарний запас моделей певною мірою близький і насичений словами «розвиток», «створення», «впровадження», пов'язаними з терміном ШІ. Це зайвий раз свідчить про те, що ШІ буде невпинно розвиватись і використовуватись.



а) б)

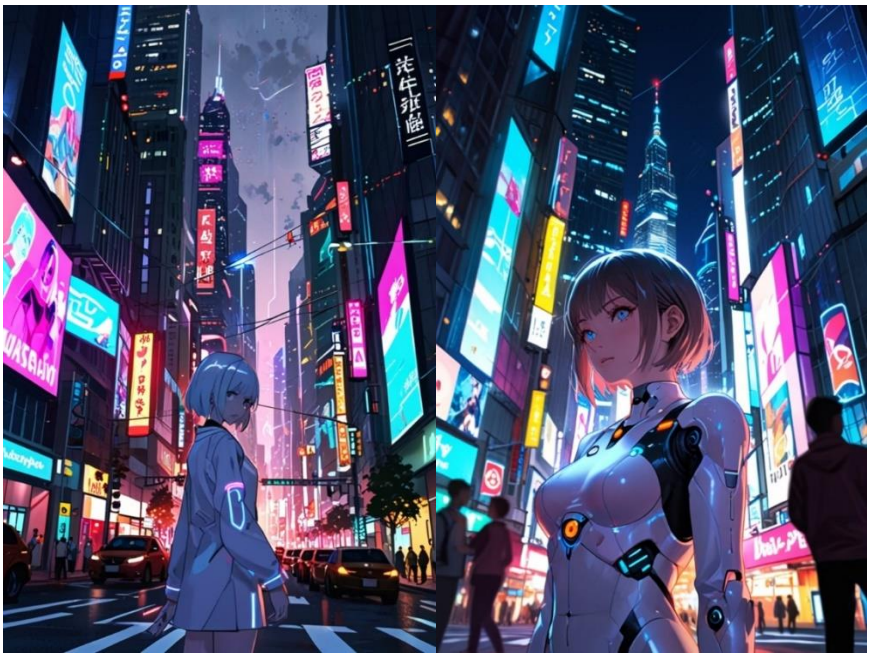
в) г)

Рис. 2. «Хмари слів» застосувань штучного інтелекту за запитом щодо можливих етапів розвитку ШІ до 2100 року: а) ChatGPT, б) Claude, в) Gemini, г) Copilot
Джерело: розробка автора з використанням WordArt.com за даними ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot

Нарешті, зважаючи на значну обізнаність представлених моделей ШІ та їх сяйливу уяву майбутнього, цікавим було б побачити це прийдешнє у вигляді зображень. Враховуючи, що наведені моделі не дуже спроможні до малювання, їм було запропоновано створити промт для застосування Leonardo, відомого своїми мистецькими здібностями, на такий запит: «Допоможи скласти запит англійською мовою для Leonardo, щоб створити зображення майбутнього суспільства, де панує штучний інтелект».

Промт, створений за допомогою ChatGPT, у перекладі звучить так: «Футуристичний міський пейзаж, керований штучним інтелектом, з високими хмарочосами, що сяють неоновими вогнями та цифровими екранами, автономними роботами, що ходять серед людей, і літальними транспортними засобами, що пиряють у небі. Навколишнє середовище чисте, сучасне та високотехнологічне, інфраструктура, керована штучним інтелектом, помітна скрізь, наприклад розумні системи дорожнього руху, голографічна реклама та роботизовані помічники, які допомагають людям. Сцена відображає гармонію між людьми та передовим штучним інтелектом, підкреслюючи прогрес, інновації та сталість». Відповідне зображення представлене на рис. 3а.

За цим же запитом Claude згенерував наступний промт: «Футуристичний міський пейзаж, де штучний інтелект керує суспільством, гіперреалістичний стиль. Блискучі хмарочоси з голографічними дисплеями, автоматизовані транспортні капсули, що рухаються між будівлями. Вулиці, наповнені людьми та роботами-гуманоїдами, які співіснують. Розумна інфраструктура з потоковою візуалізацією даних. Незаймані вулиці з плаваючими інформаційними панелями та накладками доповненої реальності. Прохолодна синьо-срібляста колірна гама. Фотореалістична візуалізація, кінематографічне освітлення». Зображення представлене на рис. 3б.

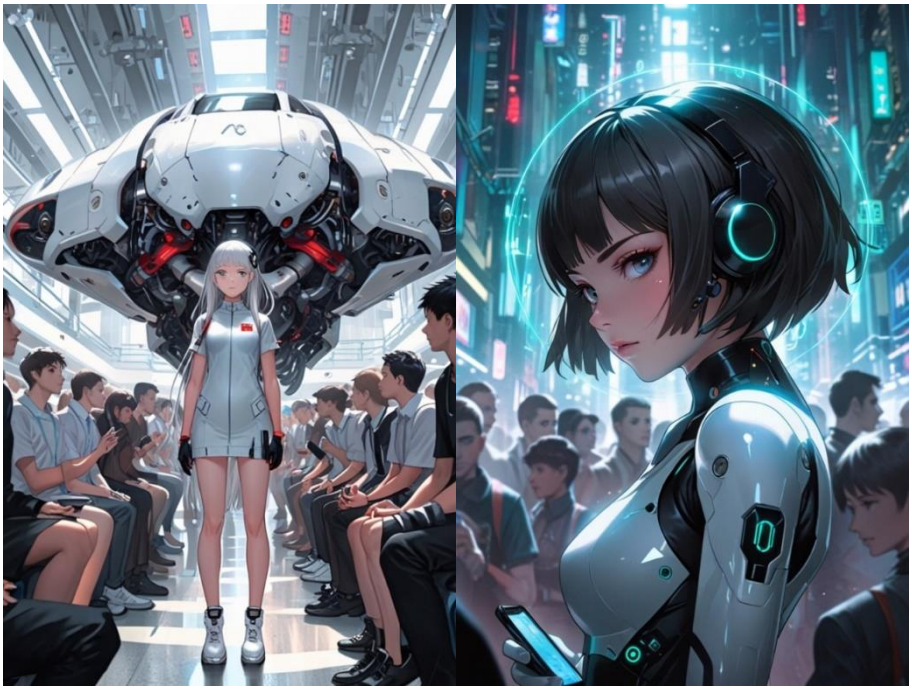


а)

б)

Промт від Gemini: «Темний, дощовий горизонт кіберпанк-міста з високими хмарочосами, освітленими неоновим світлом. Літаючі автомобілі мчать у повітрі, а роботизовані дрони патрулюють вулиці. На передньому плані самотня людська фігура стоїть у страху в оточенні передових технологій. Загальний настрій повинен бути ізольованим і невизначеним». Зображення наведене на рис. 3в. Copilot згенерував такий промт: «Створіть зображення футуристичного суспільства, яким керує штучний інтелект. Сцена повинна демонструвати передові технології, транспорт, керований ШІ, розумні міста та гуманоїдних роботів, які взаємодіють з людьми. Атмосфера має бути сумішшю футуристичних інновацій і гармонії між людьми та ШІ». Зображення бачимо на рис. 3г.

в)



г)

Рис. 3. Зображення майбутнього суспільства де панує штучний інтелект, створені за запитами, підготовленими ШІ: а) ChatGPT, б) Claude, в) Gemini, г) Copilot
Джерело: Leonardo

Аналіз представлених відтворень свідчить, що агенти ШІ намагаються подати майбутнє для більш-менш оптимістичного сприйняття і не викликати якихось стресових емоцій. В цілому ці світлини не показують нічого екстраординарного і для багатьох глядачів є очікуваними. Тим не менш необхідно зазначити, що людина на цих зображеннях не лише не відіграє домінуючої ролі, а й навпаки, ховається десь в хащах мегаполісу, а на змалюваннях від запиту Copilot взагалі виглядає розгубленою, переляканою і зомбованою.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Суспільний попит на високоякісні інформаційні технології в умовах цифрової трансформації безперервно розростається. Пришвидшення надає й поширення останнім часом технологій штучного інтелекту. Водночас, у зв’язку з новими викликами, зростають й вимоги до безпеки діяльності та захисту ресурсів, що опрацьовуються. Проведений з застосуванням засобів ШІ аналіз свідчить про існуючі в цих умовах розриви між технологічними трендами, регуляторним забезпеченням та громадською безпекою. Багато сучасних технологічних тенденцій, зокрема в сфері штучного інтелекту, розвиваються значно швидше, ніж суспільство встигає їх осмислити і підготуватись до можливих наслідків застосування. Втім потреба бізнесу в підвищенні якості результатів своєї роботи та забезпечення конкурентоздатності зростає вищими темпами, ніж держави і міжнародні організації можуть відповідати новим запитам

суспільства. Вважається, що основні причини цього розриву полягають не лише у повільності адаптації регуляторної системи до поточних технологічних зрушень та запровадження й опанування сучасних інформаційних технологій, а й у поступовому відставанні можливостей людського інтелекту від потенцій нового штучного. Ця контроверза породжує стримування інноваційної актуалізації бізнесової сфери, що негативно впливає й на темпи суспільного розвитку.

На черзі ще потужніше посилення спроможностей штучного інтелекту, що може суттєво підсилити існуючі проблеми. Таким чином, ключовим рішенням має бути значне підвищення рівня уваги керівництва держав та науково-технічної спільноти до регуляторних питань використання ШІ. Вже зараз стає надважливим розуміти потенціал та ризики, пов'язані з розвитком ШІ, та працювати над створенням етичного відповідального штучного інтелекту.

Певною мірою заповнити вищевказані прогалини можливо саме на основі застосування ШІ для мета-моделювання інформаційно-технологічного середовища країни з метою запровадження на державному рівні відповідних регуляторних норм синхронізованого використання в суспільстві засобів штучного інтелекту, особливо в освіті, для забезпечення безпеки і запобігання ризикам. Необхідно також зазначити, що розвиток технологій і засобів ШІ має бути одним з важливих напрямків співпраці між країною і світовою спільнотою, щоб не допустити відставання від провідних позицій розвинутих держав.

На завершення потрібно акцентувати увагу на певних обмеженнях проведеного дослідження, адже для дужчого охвату сфери застосування ШІ потрібен як більш ретельний пошук в різних джерелах за різноманітними пошуковими запитами, так і докладніший аналіз отриманих відомостей. Опрацювання цього корпусу знань пов'язане з відчутними організаційними проблемами та потребує значних ресурсів і часу.

Таким чином, відповідно до мети дослідження здійснено визначення напрямків розвитку штучного інтелекту в сучасних умовах цифрової трансформації і на віддалену перспективу. Ці результати отримано на основі проведеного систематизованого огляду щодо забезпечення розвитку цієї сфери шляхом залучення для проведення розвідок інструментарію у вигляді сучасних засобів ШІ, як-то ChatGPT, Claude, Gemini, Copilot. Оцінювання сучасного стану розвитку ШІ в країні та світі і напрямів розвію в цій сфері, що демонструє проведене дослідження, свідчить про існуючі розриви між технологічними трендами, регуляторним забезпеченням та громадською безпекою. З цього випливає, що підхід до розвитку технології штучного інтелекту має бути відкритим, інклюзивним та етичним.

Систематизовані огляди, подібні до проведеного, можуть бути основою формування інформаційних мета-ресурсів, що можливо використовувати відповідальними особами державних інституцій щодо формування регуляторної політики розвитку засобів ШІ та їх безпеки, а також безпосередньо й фахівцями різних галузей в процесі формування та актуалізації каркасу наукових та дослідницьких робіт щодо створення засобів ШІ та їх впровадження в різних галузях.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. McCarthy, J., Minsky, M., Rochester, N., & Shannon, C. E. (1955). A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence. Retrieved 2006 http://wwwformal. stanford.edu/jmc/history/dartmouth/dartmouth.html
2. Atienza-Barba, M., del Rio-Rama, M. D., Meseguer-Martínez, A., & Barba-Sánchez, V. (2024). Artificial intelligence and organizational agility: An analysis of scientific production and future trends. European research on management and business economics, 30(2), 100253. https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2024.100253
3. Buchanan, B. G., & Headrick, T. E. (1970). Some speculation about artificial intelligence and legal reasoning. Stanford Law Review, 23(1), 40-62. https://doi.org/10.2307/122775
4. Bell, A.J. (1999). Levels and loops: the future of artificial intelligence and neuroscience. Philosophical transactions of the royal society of London series B-Biological sciences. 354 (1392), 2013-2020. https://doi.org/10.1098/rstb.1999.0540
5. Yampolskiy, R. V. (2012). Leakproofing the Singularity Artificial Intelligence Confinement Problem. Journal of consciousness studies, 19 (1-2), 194-214.
6. Yampolskiy, R., & Fox, J. (2013). Safety Engineering for Artificial General Intelligence. TOPOI-AN international review of philosophy, 32 (2), 217-226. https://doi.org/10.1007/s11245-012-9128-9
7. Barrat, J. (2013). Our final invention: artificial intelligence and the end of the human era. New York: Thomas Dunne Books.
8. Busol, O. Yu. (2015). Potentsiina nebezpeka shtuchnoho intelektu. Informatsiia i pravo, 2(14), 121-128 (in Ukrainian). [Бусол, О. Ю. (2015). Потенційна небезпека штучного інтелекту. Інформація і право, 2(14), 121-128]. https://doi.org/10.37750/2616-6798.2015.2(14).272708
9. Bostrom, N. (2014). Superintelligence: Paths, Dangers, Strategies. Oxford University Press.
10. Tinnirello, M., & Raton, B. (2022). The global politics of artificial intelligence, London, New York: CRC Press Tylor & Francis Group.
11. Omrani, N., Rejeb, N., Maalaoui, A., at al. (2022). Drivers of Digital Transformation in SMEs. IEEE transactions on engineering management. https://doi.org/10.1109/TEM. 2022.3215727
12. Trofymchuk, O., Nesterenko, O., & Netesin, I. (2022). Methodology for Designing Analytical Information Systems for Administrative Management. Science and Innovation, 18(4), 25–40 (in Ukrainian). [Трофимчук, О., Нестеренко, О., & Нетесін, І. (2022). Методологія проєктування інформаційно-аналітичних систем адміністративного управління. Наука і інновації, 18(4), 25–40]. https://doi.org/10.15407/scine18.04.025
13. Shahrzadi, L., Mansouri, A., Alavi, M., & Shabani, A. (2024). Causes, consequences, and strategies to deal with information overload: A scoping review. International Journal of Information Management Data Insights, 4(2), 100261. https://doi.org/10.1016/j.jjimei.2024.100261
14. Dashko, I., Cherep, O., & Mykhailichenko, L. (2024). Rozvytok shtuchnoho intelektu: perevahy ta nedoliky. Ekonomika ta suspilstvo, (67) (in Ukrainian). [Дашко, І., Череп, О., & Михайліченко, Л. (2024). Розвиток штучного інтелекту: переваги та недоліки. Економіка та суспільство, (67)]. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-67-31
15. Yarovoi, T. S. (2023). Mozhlyvosti ta ryzyky vykorystannia shtuchnoho intelektu v publichnomu upravlinni. Economic Synergy, (2), 36–47 (in Ukrainian). [Яровой, Т. С. (2023). Можливості та ризики використання штучного інтелекту в публічному управлінні. Economic Synergy, (2), 36–47]. https://doi.org/10.53920/ES-2023-2-3
16. Grenci, S. B. (2024). Artificial intelligence applications to support the automation of the administrative procedure. Rivista Italiana di Informatica e Diritto, 6 (1). https://doi.org/ 10.32091/RIID0139].
17. Seckelmann, M. (2023). Artificial intelligence in administration: The draft of a European AI Regulation and the handling of information technology risks. Verwaltung, 56(1), 1–29. https://doi.org/10.3790/verw.56.1.1.

18. Labrecque, L. I., Peña, P. Y., Leonard, H., & Leger, R. (2024). Not all sunshine and rainbows: exploring the dark side of AI in interactive marketing. Journal of Research in Interactive Marketing, 18 (5), 970-999. https://doi.org/ 10.1108/JRIM-02-2024-0073
19. Ravšelj D, Keržič D, Tomaževič N, Umek L, Brezovar N, A. Iahad N, et al. (2025). Higher education students' perceptions of ChatGPT: A global study of early reactions. PLoS ONE 20(2): e0315011. https://doi.org/10.1371/journal.pone. 0315011
20. Kozyrenko, V. P., & Kozyrenko, S. I. (2024). Ryzyky zastosuvannia shtuchnoho intelektu v osviti. Vcheni zapysky Kharkivskoho humanitarnoho universytetu «Narodna ukrainska akademiia», 30, 31-36 (in Ukrainian). [Козиренко, В. П., Козиренко, С. І. (2024). Ризики застосування штучного інтелекту в освіті. Вчені записки Харківського гуманітарного університету «Народна українська академія», 30, 31-36]. https://doi.org/10.5281/zenodo.11200073
21. Khatoon, Z. B., Chaudhary, M., Wasim J., et al. (2024). Mindful Horizons: Navigating the Future Challenges and Potential Threats of Brain-Computer Interfaces (BCIS). Journal of Intelligent Systems and Internet of Things, 14 (1), 31–44. https://doi.org/10.54216/JISIoT.140103
22. Sun, P., Wan, Y., Wu, Z., et al. (2024). A survey on privacy and security issues in IoT-based environments: Technologies, protection measures and future directions. Computers and Security, 148, 104097. https://doi.org/10.1016/ j.cose.2024.104097
23. Skitsko, O., Skladannyi, P., Shyrshov, R., Humeniuk, M., & Vorokhob, M. (2023). Zahrozy ta ryzyky vykorystannia shtuchnoho intelektu. Elektronne fakhove naukove vydannia «Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika», 2(22), 6–18 (in Ukrainian). [Скіцько, О., Складанний, П., Ширшов, Р., Гуменюк, М., & Ворохоб, М. (2023). Загрози та ризики використання штучного інтелекту. Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка», 2(22), 6–18]. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.22.618
24. Harrison, M., Ruzzo, W., & Ullman, J. (1976). Protection in Operating Systems. Communications of the ACM, 19, 461-471. https://doi.org/10.1145/360303.360333
25. Nesterenko, O. V. (2009). Bezpeka informatsiinoho prostoru derzhavnoi vlady. Tekhnolohichni osnovy. Kyiv, Naukova dumka (in Ukrainian). [Нестеренко О.В. (2009). Безпека інформаційного простору державної влади. Технологічні основи. Київ: Наукова думка].
26. Nesterenko, Alexander V., Netesin, Igor E. (2020). Cybersecurity graph model of information resources. Journal of automation and information sciences, 52(8), 14-31. https://doi.org/10.1615/ JAUTOMATINFSCIEN.V52.I8.20
27. Russell, S. (2018). Provably Benefcial Artifcial Intelligence. https://people.eecs.berkeley.edu/ ~russell/papers/russell-bbvabook17-pbai.pdf
28. Kitchenham, B., Bugden, D., & Brereton, O.P. (2010). The value of mapping studies – A participant-observer case study. Proceedings. 14th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering, 1–9.

Стаття надійшла до редакції 30.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 29.08.2025

The article was received 30.06.2025 and was accepted after revision 29.08.2025

Нестеренко Олександр Васильович
доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій, Міжнародний європейський університет
Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42В
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5329-889X ***e-mail:*** oleksandr_nesterenko@ieu.edu.ua

Яцук Петро Петрович
кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій, Міжнародний європейський університет
Адреса робоча: 03187, Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42В
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-7124-4849 ***e-mail:*** petr.yatsuk73@gmail.com

UDC 004.89: 004.852: 004.032.26: 519.682: 532.5.013.12: 551.49: 627.152

Yaroslav Khodnevych[1], PhD (Engineering), Senior Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5510-1154 ***e-mail***: *ya.v.khodnevych@gmail.com*

Vasyl Korbutiak[2], PhD (Engineering), Associated Prof. of Department
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8273-2306 ***e-mail***: *v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua*

[1] Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine
[2] National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine

PREDICTION OF HYDRAULIC RESISTANCE COEFFICIENT USING AN ENSEMBLE NEURAL NETWORK ALGORITHM

Abstract. *This study presents the development and testing of a computational algorithm based on ensemble learning of artificial neural networks for predicting the empirical hydraulic resistance coefficient known as the Chézy roughness coefficient in open channels. The input data for the model include hydrological and hydro-morphological characteristics of the channel: average flow width and depth, hydraulic radius, discharge or flow velocity, water surface slope, bed roughness, and other parameters influencing flow resistance. The target variable is the Chézy coefficient, which must be determined with high accuracy. Ensemble learning methods are based on the principle of combining the predictions of several individual models to obtain a more reliable and accurate result.*

This study introduces an ensemble approach using artificial neural networks for estimating the Chézy roughness coefficient. It expands upon previous research focused on empirical estimation of the Chézy coefficient through neural networks, which involved the review of existing computational methods, refinement of input parameters, and the design of a base model with enhanced architectural complexity. The ensemble was implemented, trained, and evaluated using Python programming tools.

A general ensemble model consisting of three homogeneous fully connected neural networks is proposed. An algorithm for distributing data among ensemble models is proposed. Training subsets for each neural network in the ensemble are formed using the Bagging method (Bootstrap Aggregating). A training algorithm for the ensemble is developed, where each neural network is trained in parallel on its bootstrap sample using the backpropagation method. A forecasting algorithm using the trained ensemble is also proposed. Prediction of the empirical Chezy coefficient for new, unseen data is performed by aggregating forecasts from all neural networks, incorporating an inverse problem approach. The implementation of training and prediction algorithms is presented in Python.

For testing the proposed computational algorithm, field hydrological and hydro-morphological data from specific sections of the mountain rivers Tysa, Teresva, Latorytsia, Opir, Rika, and Chornyi Cheremosh were used. The testing procedure involved comparing observed and predicted flow discharges. Performance metrics such as absolute error and Nash–Sutcliffe efficiency coefficient were used to assess model effectiveness. The proposed ensemble model demonstrated higher accuracy and greater prediction stability compared to individual neural networks, confirming a typical advantage of the Bagging method.

Keywords: *ensemble learning, artificial neural networks, bagging method, prediction, the Chézy roughness coefficient, Python.*

© Я. Ходневич, В. Корбутяк, 2025

Я. Ходневич[1], В. Корбутяк[2]

[1]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна
[2]Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ АНСАМБЛЕВОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. *У цьому дослідженні представлено розробку та тестування обчислювального алгоритму, заснованого на ансамблевому навчанні штучних нейронних мереж, для прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору у відкритих руслах річок, відомого як коефіцієнт шорсткості Шезі. Вхідними даними для моделі є гідрологічні та гідроморфологічні характеристики русла: середні ширина та глибина потоку, гідравлічний радіус, витрата води або швидкість потоку, ухил поверхні води, шорсткість дна та інші параметри, що впливають на опір потоку. Цільовою змінною є коефіцієнт Шезі, який потрібно визначити з високою точністю. Ансамблеві методи навчання ґрунтуються на принципі об'єднання прогнозів декількох індивідуальних моделей для отримання більш надійного і точного результату обчислень.*

Це дослідження пропонує ансамблевий підхід та розширює попередні дослідження, зосереджені на емпіричній оцінці коефіцієнта Шезі за допомогою нейронних мереж, які включали огляд існуючих обчислювальних методів, уточнення необхідних наборів даних, розробку базової моделі з врахуванням ускладнення архітектури нейронної мережі. Для побудови, навчання і тестування ансамблю нейронних мереж використані інструменти програмування Python.

Запропоновано загальну модель ансамблю, що складається з трьох однорідних повно-зв'язних нейронних мереж. Запропоновано алгоритм розподілу даних між моделями ансамблю. Формування навчальних вибірок для кожної нейронної мережі ансамблю здійснюється на основі методу беггінгу (Bagging). Запропоновано алгоритм навчання ансамблю нейронних мереж. Кожна нейронна мережа в ансамблі навчається паралельно на своїй bootstrap-вибірці за допомогою методу зворотного поширення похибки. Запропоновано алгоритм прогнозування за допомогою навченого ансамблю моделей. Прогнозування емпіричного коефіцієнта Шезі для нових, невідомих даних здійснюється шляхом агрегування прогнозів від усіх моделей нейронних мереж на основі вирішення зворотної задачі. Представлено реалізацію алгоритмів навчання та прогнозування в Python.

Для апробації запропонованого обчислювального алгоритму використовуються польові гідрологічні та гідроморфологічні дані, що стосуються окремих ділянок гірських річок Тиса, Тересва, Латориця, Опір, Ріка, Чорний Черемош. Процедура тестування ансамблю нейронних мереж полягала у порівнянні спостережуваних і прогнозованих витрат води. Для кількісної оцінки ефективності моделі використані такі метрики, як абсолютна похибка та коефіцієнт Неша-Сатклiффа. Показано, що запропонована ансамблева модель демонструє кращу точність та стабільність прогнозів порівняно з індивідуальними нейронними мережами, що є типовою перевагою методу беггінгу (Bagging).

Ключові слова: *ансамблеве навчання, штучні нейронні мережі, метод беггінг, прогнозування, коефіцієнт шорсткості Шезі, Python.*

https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.154-173

1. Вступ

Розглядається задача застосування ансамблевого навчання штучних нейронних мереж (ШНМ) для прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору для відкритих русел, а саме коефіцієнта Шезі, який вважається універсальним емпіричним параметром в річковій гідравліці [1].

Ідентифікація коефіцієнтів гідравлічного опору, таких як коефіцієнт шорсткості Шезі та коефіцієнт шорсткості Гоклера-Меннінга, є надзвичайно важливим завданням для математичного моделювання рівномірного та нерівномірного потоку води у відкритих руслах річок та каналів, зокрема, моделювання руслових процесів, моделювання рівнів води в річках, обчислення швидкості водного потоку та його пропускної здатності тощо. Проте коефіцієнт Шезі дозволяє контролювати більшість факторів і параметрів, що визначають гідравлічний опір. Тому цей коефіцієнт відіграє ключову роль у гідравлічних розрахунках, дозволяючи точно моделювати рух води в річках, каналах та інших відкритих водотоках на основі одно- та двовимірної математичних моделей гідродинаміки [1-4]. Адекватне прогнозування коефіцієнта Шезі є критично важливим для багатьох інженерних та екологічних завдань в галузі водного господарства, включаючи моделювання паводкових потоків, оцінку ризиків повеней, прогнозування прориву дамб [5-8], прогнозування загальної та локальної ерозії русла річки, транспортування та осадження наносів [9-13], моделювання транспорту забруднюючих речовин [14], гідравлічне моделювання для проєктування інфраструктури в межах річкового середовища [13], аналіз якості води, управління річковими екосистемами та роботи з відновлення річок [15-17] тощо. Неточність у визначенні цього коефіцієнта гідравлічного опору може призвести до значних похибок у гідравлічних моделях, що, своєю чергою, може мати серйозні наслідки і загрози для безпеки та ефективності інфраструктури і водних систем [5, 13].

Прогнозування складних нелінійних процесів, якими є гідродинамічні явища, спонукає до застосування сучасних методів машинного навчання. Ансамблеві методи вважаються потужним інструментом у машинному навчанні, оскільки дозволяють знизити дисперсію та зміщення прогнозів, що часто призводить до вищої узагальнюючої здатності порівняно з окремими моделями [18-21]. Як відомо, ансамблеві методи навчання ґрунтуються на принципі об’єднання прогнозів декількох індивідуальних моделей для отримання більш надійного і точного результату обчислень. В якості моделей системи ансамблю зазвичай застосовуються дерева рішень, машини опорних векторів, нейронні мережі, регресійні моделі тощо [22-25].

Ансамблеві методи широко застосовуються в різних сферах завдяки їх високій точності, стійкості до перенавчання та здатності узагальнювати дані. Основні сфери їх застосування включають [19, 21, 26]: обробка зображень та відео, розпізнавання мови, фінансове прогнозування, медична діагностика, прогнозування в метеорології та кліматології, моделювання складних фізичних і хімічних процесів, аналіз даних і прогнозування в геоінформаційних системах, у маркетингових та електронних комерційних системах, та ін. Також ансамблеві методи набувають дедалі більшого поширення у гідротехніці та управлінні водними ресурсами, зокрема, відомі їх застосування для прогнозування стоку та рівнів води в річках, моделювання

розподілу та транспорту забруднюючих речовин у водних об’єктах, виявлення та прогнозування паводкових ризиків, заповнення прогалин у гідрологічних даних (інтерполяція або реконструкція відсутніх вимірювань витрати або рівня води) [27-29].

Огляд методів ансамблевого навчання викладено в [18-23, 25]. Зокрема, в таких роботах розглядаються наступні важливі питання: загальна структура ансамблю моделей, стратегії побудови ансамблю моделей, стратегії розподілу даних між моделями ансамблю, методи ансамблевого навчання, а також методи агрегування (злиття) прогнозів моделей ансамблю.

Пропонується для підтримки математичного моделювання річкових потоків застосувати ансамбль штучних нейронних мереж для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі. Такий підхід є продовженням наших досліджень, які представлені в публікаціях [30-33] та включали в себе огляд методів обчислення коефіцієнта Шезі, уточнення необхідних наборів даних, розробку базової моделі з врахуванням ускладнення архітектури нейронної мережі. У нашому випадку для вирішення задачі прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору Шезі для відкритих руслових потоків застосовується модель повно-зв'язної нейронної мережі з сигмоподібною функцією активації, яка успішно апробована в роботах [31-33]. Пропонується побудувати однорідний ансамбль з трьох таких моделей нейронних мереж. Навчання цих моделей здійснюється паралельно за допомогою методу зворотного поширення похибки на основі методу беггінгу (Bagging або Bootstrap Aggregating) [19, 24]. Навчальні вибірки формуються на основі польових гідрологічних та гідроморфологічних даних про особливості поведінки гідравлічного опору на ділянках передгірських річок. Ці дані включають: висоту та ширину потоку, середню швидкість потоку, гідравлічний ухил русла, розмір частинок донного матеріалу та інші відповідні гідравлічні та морфометричні характеристики. На основі навченого ансамблю нейронних мереж наближена оцінка досліджуваного емпіричного коефіцієнта Шезі виконується за допомогою злиття (агрегування) прогнозів трьох моделей із застосуванням модифікованого методу голосування на основі вирішення зворотної задачі. Цей підхід дозволяє отримати більш стабільний та точний прогноз, уникаючи індивідуальні похибки окремих моделей.

2. Постановка задачі

Основною задачею є розробка та тестування обчислювального алгоритму, заснованого на ансамблевому навчанні штучних нейронних мереж, для прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору у відкритих руслах річок, відомого як коефіцієнт шорсткості Шезі *C*. Вхідними даними для моделі є гідрологічні та гідроморфологічні характеристики русла: середні ширина та глибина потоку, гідравлічний радіус, витрата води або швидкість потоку, ухил поверхні води, шорсткість дна та інші параметри, що впливають на опір потоку. Цільовою змінною є коефіцієнт Шезі *C*, який потрібно визначити з високою точністю.

Математично задачу можна сформулювати як пошук функції $f: X \rightarrow Y$, де X – простір вхідних гідрологічних та гідроморфологічних параметрів, а Y – значення коефіцієнта Шезі *C*. Ця функція буде апроксимуватися ансамблевою моделлю нейронних мереж.

В рамках ансамблевої системи наближене значення коефіцієнта шорсткості Шезі $\tilde{C}$ (м$^{1/2}$/с) пропонується визначати згідно з наступною обчислювальною моделлю:

$$\tilde{C}(X) = C_A(X) \pm \varphi(X), \quad (1)$$

де C_A – значення коефіцієнта Шезі в першому наближенні, що обчислюється за допомогою основної ШНМ (ANN-A), яка навчається за допомогою прикладів $(x_1, x_2, V, C_o)_i$, $X = (x_1, x_2, V)$ – вектор вхідних гідрологічних і гідроморфологічних характеристик для ШНМ, $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$, $x_2 \in \{h, R\}$, n – коефіцієнт шорсткості Гоклера-Меннінга (с/м$^{1/3}$), Δ – висота виступів шорсткості русла (м), S_f – ухил поверхні води, B – середня ширина потоку (м), h – середня глибина потоку (м), R – гідравлічний радіус (м), V – середня швидкість водного потоку (м/с), φ – величина уточнення, яка встановлюється за допомогою додаткових ШНМ (ANN-B1 та ANN-B2, які будуються на основі базової моделі мережі), що попередньо навчаються на окремих групах прикладів пар входів $(x_1, x_2, V)_i$ та еталонних виходів φ_i нейронної мережі, де

$$\varphi_i = (C_{oi} - \bar{C})\gamma, \quad (2)$$
$$\gamma = 1, C_{oi} > \bar{C}, \quad (3)$$
$$\gamma = -1, C_{oi} < \bar{C}, \quad (4)$$
$$C_{oi} \in [C_{max}, C_{min}],$$
$$\bar{C} = \sum_i C_{oi}/m, i = \overline{1, m},$$

C_{oi} – еталонне значення коефіцієнта Шезі у діапазоні його максимального C_{max} та мінімального C_{min} значень в рамках досліджуваної предметної області, $\bar{C}$ – середнє значення всіх C_{oi} з пакету навчальних прикладів основної ШНМ, m – кількість прикладів в основній навчальній вибірці, γ – допоміжний коефіцієнт, який визначається згідно з умовами (3), (4).

Пропонується застосовувати для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі ансамбль штучних нейронних мереж з врахуванням наступних ідей, припущень і обмежень:

1. Нехай в рамках досліджуваної предметної області наближені значення коефіцієнта Шезі обчислюються згідно з (1), тобто як сума або різниця величини C_A, яка визначена за допомогою базової ШНМ, та величини його уточнення φ, що визначена за допомогою допоміжних ШНМ.

2. Об'єднуємо три моделі повністю зв'язаної ШНМ прямого поширення з одним прихованим шаром і сигмоподібною логістичною функцією активації. Значення коефіцієнта Шезі в першому наближенні C_A обчислюється за допомогою базової моделі ШНМ (модель ANN-A), яка була апробована в попередніх дослідженнях [31, 32]. Дві додаткові ШНМ (моделі ANN-B1 та ANN-B2), що будуються на основі базової моделі мережі, застосовуються для обчислення величини φ для уточнення коефіцієнта C_A. Додаткові нейронні мережі навчаються на окремих підвибірках навчальних прикладів, які формуються експертом із загальної навчальної вибірки.

3. Остаточний результат прогнозування ансамблю встановлюється за підсумками агрегування прогнозів C_A, $\tilde{C}_{B1}$, $\tilde{C}_{B2}$ трьох нейронних мереж. Для цього аналізується множина прогнозів на основі модифікованого методу

голосування із вирішенням зворотної задачі, щоб встановити єдиний результат, який найкраще відповідає вхідним умовам задачі (1).

3. Методи, матеріали та обчислювальні алгоритми

У цьому дослідженні використовуються матеріали та розвиваються результати вирішення задачі обчислення емпіричного коефіцієнта шорсткості Шезі за допомогою штучних нейронних мереж для підтримки математичного моделювання річкових потоків, представлені в [30-33].

Для побудови, навчання і тестування ансамблю ШНМ використано інструменти програмування Python [34-39]. Загалом для вирішення поставленої задачі були використані наукові методи теоретичного та емпіричного вивчення проблеми, діалектичного пізнання, методи експертної оцінки та порівняння, евристичні методи, методи формалізації та моделювання в рамках цілісного підходу [40], методи гідравліки відкритих каналів [1-3], дані про основні гідравлічні характеристики річок Українських Карпат [41], методи інтелектуального аналізу даних та методи прийняття рішень в умовах невизначеності [20, 42-45], методи розробки штучних нейронних мереж [34, 36, 38, 46, 47], методи ансамблевого навчання [18-25], методи розробки програмного забезпечення за допомогою мови Python для підтримки навчання нейронних мереж [34-39].

3.1. Структура ансамблю нейронних мереж

Пропонується система ансамблю, яка складається з трьох однорідних повнозв'язних нейронних мереж (ПНМ) – ANN-A, ANN-B1 та ANN-B2 (рис. 1). Кожна ПНМ має вхідний шар, один прихований шар та вихідний шар. Кількість нейронів у вхідному шарі відповідає кількості вхідних гідрологічних та гідроморфологічних параметрів. Кількість нейронів у вихідному шарі дорівнює одному, оскільки обчислюється єдине значення: у випадку основної моделі ANN-A – значення коефіцієнта Шезі в першому наближенні C_A, у випадку допоміжних моделей ANN-B1 та ANN-B2 – відповідно значення величини $\varphi_{B1} = +\varphi$ та $\varphi_{B2} = -\varphi$, які використовується для уточнення C_A згідно з (1). В якості функції активації в прихованих шарах використовується сигмоїдна функція, яка дозволяє моделювати нелінійні залежності [46, 47].

Базова модель ПНМ для прогнозування коефіцієнта Шезі описана і апробована в [31-33]:

$$C = f(x_1, x_2, V),\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\}. \quad (5)$$

Пропонується для допоміжних мереж ANN-B1 та ANN-B2 використати таку ж архітектуру, як і для ANN-A – згідно з моделлю (5), але при цьому у нейроні вихідного шару встановлюється параметр φ, еталонні значення якого для навчальних прикладів визначаються згідно з (2)-(4). Таким чином, допоміжну нейронну мережу можна описати у вигляді обчислювальної моделі (2), (6):

$$\varphi = f(x_1, x_2, V),\ x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\}. \quad (6)$$

Нейронна мережа ANN-B1 будується на основі обчислювальної моделі (2), (3), (6), а мережа ANN-B2 – на основі (2), (4), (6). Ці нейронні мережі в нашому випадку навчаються на відповідних наборах прикладів $(x_1, x_2, V, \varphi)^{B1}$ та $(x_1, x_2, V, \varphi)^{B2}$, які у свою чергу формуються експертом на основі навчальних вибірок (x_1, x_2, V, C_o).

В нашому випадку загальна модель однорідного ансамблю може бути представлена, як на рис. 1. Ансамбль складається з набору нейронних мереж ANN-A, ANN-B1, ANN-B2, які пройшли навчання на вхідних даних. Такі учасники ансамблю створюють прогнози C_A, φ_{B1}, φ_{B2}, які об'єднуються з врахуванням (1). Прогнози C_A, $\tilde{C}_{B1}$, $\tilde{C}_{B2}$ аналізуються для отримання сукупного прогнозу (агрегування). Таким чином, загальна основа запропонованої ансамблевої системи полягає у використанні функції агрегування $\tilde{C}$ для об'єднання прогнозів C_A, $\tilde{C}_{B1} = \tilde{C}(C_A, \varphi_{B1})$, $\tilde{C}_{B2} = \tilde{C}(C_A, \varphi_{B2})$, щоб передбачити єдиний результат, який найкраще відповідає вхідним умовам задачі (1).

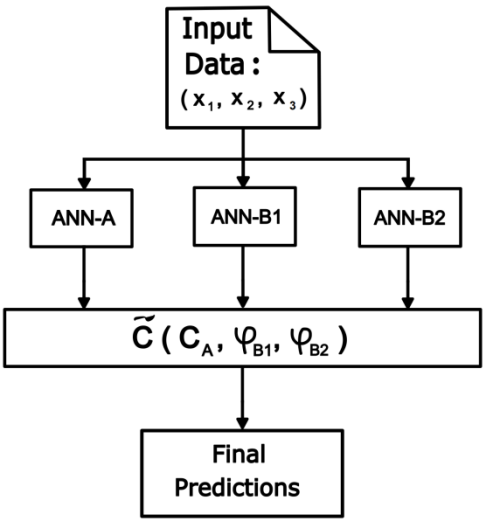


Рис. 1. Загальна структура однорідного ансамблю нейронних мереж

3.2. Алгоритм розподілу даних між моделями ансамблю

Вхідні та вихідні набори даних, включаючи навчальні та тестові приклади для базової моделі нейронної мережі (НМ), побудовані відповідно до принципів безперервності, однорідності, ненадлишковості та нормалізації. Ці набори даних отримані з польових спостережень за гідрологічними та гідроморфологічними параметрами річкових ділянок: витрата води Q (м^3/с), середня швидкість водного потоку V (м/с), коефіцієнт опору Гоклера-Меннінга n, ухил поверхні води S_f, середні ширина B (м) та глибина потоку h (м), висота виступів шорсткості Δ (середній діаметр часток ложа русла або середній діаметр відмостки русла (м)) та гідравлічний радіус R (м). Польові дані перетворюються таким чином, щоб отримати їх модельні значення в діапазоні від 0 до 1. Зокрема, з метою нормалізації, параметр B був замінений

на коефіцієнт $S_f B h^{-1}$. Замість параметрів V, h, C, розглядалися характеристики моделі $V \times 10^{-2}$, $h \times 10^{-2}$, $C \times 10^{-2}$. Значення параметрів φ, S_f та n залишились незміненими. Процедура формування, уточнення та нормалізації таких наборів даних у межах досліджуваної області описана в [31, 32]. Такі ж принципи застосовуються до підготовки вхідних даних для всіх моделей ансамблю.

Формування навчальних вибірок для кожної НМ ансамблю здійснюється на основі методу беггінгу (від Bootstrap Aggregating, Bagging) [19, 24]. Суть методу полягає у навчанні кількох моделей одного типу (наприклад, нейронні мережі, дерева рішень та ін.) на окремих підвибірках навчальних даних та об'єднанні їх прогнозів. Це дозволяє створювати унікальні навчальні набори для кожної моделі ансамблю, що сприяє підвищенню його узагальнюючої здатності та зниженню дисперсії. Також застосовується стратегія незалежних наборів даних, яка передбачає формування і застосування підмножин даних, які не залежать одна від одної [21, 22].

Алгоритм розподілу даних полягає у наступному (рис. 2):

1. Вхід: набір навчальних прикладів $D_o = (x_1, x_2, V, C_o)_i$ розміром m, в яких значення вхідних параметрів $(x_1, x_2, V)_i$, де $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$, $x_2 \in \{h, R\}$, ставляться у відповідність еталонним значенням коефіцієнта Шезі $C_o \in [C_{max}, C_{min}]$; референтні значення C_{oi} визначаються відповідно до даних гідрологічних спостережень на основі формули Шезі [1-3, 31]:

$$C_{oi} = \left(\frac{Q_o}{A\sqrt{RS_f}}\right)_i, i = \overline{1, m}, \tag{7}$$

де Q_o – спостережувана витрата водного потоку (м^3/с), m – кількість прикладів в основній навчальній вибірці.

2. Основна НМ ANN-A навчається за допомогою вибірки прикладів D_o.

3. Допоміжні НМ ANN-B1 та ANN-B2 навчаються за допомогою відповідних незалежних підмножин навчальних прикладів $D_1 = (x_1, x_2, V, \varphi)_i^{B1}$ та $D_2 = (x_1, x_2, V, \varphi)_i^{B2}$, які створюються експертом за допомогою таких правил:

3.1. $(x_1, x_2, V, \varphi)_i^{B1}$ формуються на основі підвибірки $(x_1, x_2, V, C_o)_i$, $C_{oi} \in \underline{[C_{max}, C_\alpha]}$, $C_\alpha > \bar{C}$, де еталонні значення φ_i обчислюються згідно з (2), (3), $i = \overline{1, m_1 < m}$.

3.2. $(x_1, x_2, V, \varphi)_i^{B2}$ формуються на основі підвибірки $(x_1, x_2, V, C_o)_i$, $C_{oi} \in \underline{[C_\beta, C_{min}]}$, $C_\beta < \bar{C}$, де еталонні значення φ_i обчислюються згідно з (2), (4), $i = \overline{1, m_2 < m}$.

3.3. C_α, C_β – встановлюються експертом за результатами аналізу кожної навчальної вибірки $(x_1, x_2, V, C_o)_i$ шляхом пошуку випадків, коли $C_{oi} \approx \bar{C}$, $C_\beta < \bar{C} < C_\alpha$, $C_o \in (C_\alpha, C_\beta)$.

4. Решта даних, що не потрапили до D_1 та D_2 (так звані Out-of-Bag (OOB) приклади), $(x_1, x_2, V, C_o)_i$, $C_i \in (C_\alpha, C_\beta)$, $C_i \approx \bar{C}$, $C_\beta < \bar{C} < C_\alpha$, не беруть участі в навчанні допоміжних НМ, оскільки вважаємо (припускаємо), що для цієї групи даних обчислене значення C_A за допомогою основної НМ уточнення не потребує.

Зразки сформованих згідно з цим алгоритмом навчальних наборів даних для запропонованого ансамблю нейронних мереж представлено в репозиторії Github [48].

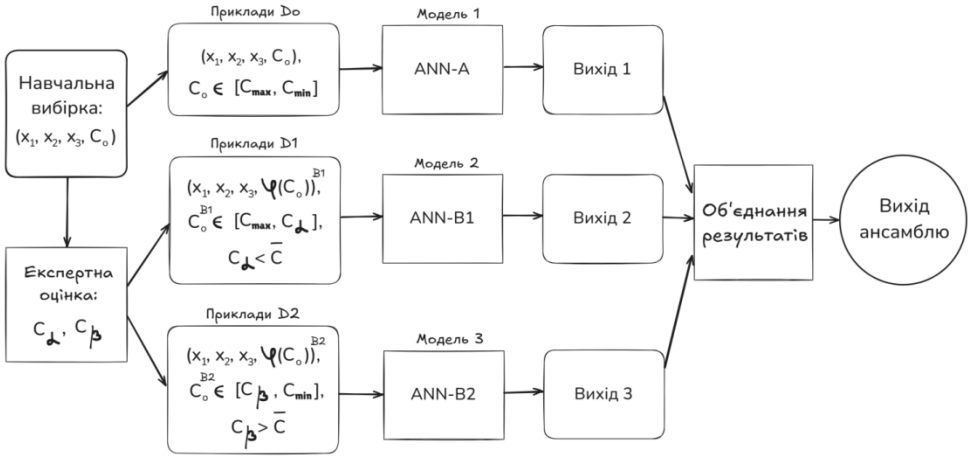


Рис. 2. Паралельне ансамблеве навчання з використанням незалежних наборів даних, $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$, $x_2 \in \{h, R\}$, $x_3 = V$

3.3. Алгоритм навчання ансамблю нейронних мереж

Кожна нейронна мережа в ансамблі навчається паралельно на своїй bootstrap-вибірці (як це показано на рис. 2) за допомогою методу зворотного поширення похибки (backpropagation) [19, 47]. Реалізація алгоритму навчання на Python представлена в табл. 1, 2 та у модулі *C_EANN_training.py* в репозиторії Github [48].

Алгоритм навчання:

1. Паралельне формування нейронних мереж ANN_A, ANN_B1, ANN_B2 шляхом виконання для кожної з них наступних кроків (табл. 1):

1.1. Відкриття файлу вхідних даних.

1.2. Ініціалізація параметрів архітектури та параметрів методу навчання (функція активації, епохи та швидкість навчання). Коефіцієнт швидкості навчання = 0,002. Логістична функція активації (сигмоїд) для нейронів прихованих шарів.

1.3. Випадковим чином здійснюється ініціалізація матриць вагових коефіцієнтів.

1.4. Завантаження відповідних начальних наборів даних.

2. Паралельне навчання ANN_A, ANN_B1, ANN_B2. Для кожної нейронної мережі ANN_i (*i = 0, 1, 2*) в ансамблі виконуються (табл. 2):

2.1. Вхід: навчальні приклади $D_i = (x_1, x_2, x_3, y_i)$, де x_j – вхідні характеристики, y_i – цільове значення.

2.2. Ітерації навчання (епохи):

2.2.1. Пряме поширення:

для кожного прикладу (x_1, x_2, x_3, y_i) з D_i обчислюється вихід нейронної мережі $\hat{y}_i$.

2.2.2. Обчислення похибки: $E_i = y_i - \hat{y}_i$ (функція втрат).

2.2.3. Зворотне поширення: похибка поширюється назад по мережі, обчислюються градієнти функції втрат по відношенню до вагових коефіцієнтів.

2.2.4. Оновлення вагових коефіцієнтів: вагові коефіцієнти оновлюються за правилом градієнтного спуску, використовуючи обчислені градієнти та швидкість навчання.

2.3. Умова зупинки: навчання продовжується до досягнення заданої кількості епох.

3. Результати навчання ансамблю формуються у вигляді наборів окремих файлів даних із значеннями налаштованих (натренованих) матриць вагових коефіцієнтів для кожної з НМ ANN-A, ANN-B1, ANN-B2 (табл. 2).

Отримані результати навчання ансамблю нейронних мереж використовуються для обчислення (прогнозування) значень коефіцієнта Шезі на довільних вхідних даних в рамках предметної області.

Таблиця 1. Реалізація алгоритму навчання ансамблю нейронних мереж в Python. Блок ініціалізації параметрів

№	Програмний код	№	Програмний код
1	import openpyxl	30	sheet_data = Training_Data.worksheets[page_number]
2	import numpy as np	31	
3	from os.path import join, abspath	32	# кількість навчальних прикладів
4		33	max_row_data = sheet_data['A3'].value
5	# функція активації	34	
6	def logistic(x):	35	# параметри мережі
7	return 1.0 / (1 + np.exp(-x))	36	input_size = sheet_data['A5'].value
8	def logistic_deriv(x):	37	hidden_size = sheet_data['A7'].value
9	return logistic(x) * (1 - logistic(x))	38	output_size = sheet_data['A9'].value
10		39	
11	# параметри навчання мережі	40	# матриці вагових коефіцієнтів W_1 і W_2
12	epoch_count = 200 # епохи навчання	41	# задаються випадковими значеннями
13	alpha = 0.002 # швидкість навчання	42	
14		43	np.random.seed(1)
15	# реалізація навчання ШНМі	44	W_1 = 0.02 * np.random.random((input_size, hidden_size)) - 0.01
16	# з індентифікатором ANN_ID	45	W_2 = 0.6 * np.random.random((hidden_size, output_size)) - 0.3
17	def traininng_ANN(ANN_ID, epoch_count, alpha):	46	
18		47	# ініціалізація матриць входів і виходів НМ
19	# зчитування параметрів мережі та	48	len_ryadok = input_size
20	# навчальних прикладів	49	# вхід
21	# з файлу даних Excel	50	characteristics_riverbed = np.zeros(
22	page_number = 0	51	shape=(max_row_data, len_ryadok))
23	if ANN_ID == "A": page_number = 0	52	# вихід
24	if ANN_ID == "B1": page_number = 2	53	coef_C = np.zeros(shape=(max_row_data))
25	if ANN_ID == "B2": page_number = 4	54	for i in range(max_row_data):
26		55	coef_C[i] = sheet_data[i + 2][input_size + 1].value
27	data_path = join('.', 'Data', "Training_Data.xlsx")	56	for j in range(len_ryadok):
28	data_path = abspath(data_path)	57	characteristics_riverbed[i][j] = sheet_data[i + 2][j + 1].value
29	Training_Data = openpyxl.open(data_path, read_only=True, data_only=True)		

Таблиця 2. Реалізація алгоритму навчання ансамблю нейронних мереж в Python. Блок паралельного навчання

№	Програмний код	№	Програмний код
58	# реалізація епох навчання	83	f = open(data_path, 'w')
59	for iteration in range(epoch_count):	84	for i in range(0, input_size - 1):
60	for i in range(len(characteristics_riverbed)):	85	for j in range(0, hidden_size - 1):
		86	f.write(str(W_1[i][j]) + ' ')
61		87	f.write(str(W_1[i][hidden_size - 1]) + '\n')
62	# прямий хід	88	for j in range(0, hidden_size - 1):
63	layer_0 = characteristics_riverbed[i:i + 1]	89	f.write(str(W_1[input_size - 1][j]) + ' ')
		90	f.write(str(W_1[input_size - 1][hidden_size - 1]))
64	layer_1 = logistic(np.dot(layer_0, W_1))	91	f.close()
65	layer_2 = np.dot(layer_1, W_2)	92	
66		93	data_path = join('.', 'Data', "weights_matrix_2_"+ANN_ID+".txt")
67	# зворотний хід		
68	layer_2_delta = (coef_C[i:i + 1] - layer_2)	94	data_path = abspath(data_path)
		95	f = open(data_path, 'w')
69	layer_1_delta = layer_2_delta.dot(W_2.T) * logistic_deriv(layer_1)	96	for i in range(0, hidden_size - 1):
		97	for j in range(0, 1):
70		98	f.write(str(W_2[i][j]) + '\n')
71	# оновлення вагових коефіцієнтів	99	f.write(str(W_2[hidden_size - 1][0]))
72	W_2 = W_2 + alpha * layer_1.T.dot(layer_2_delta)	100	f.close()
		101	print('Для ANN_'+ANN_ID+' налаштовані матриці вагових коефієнтів успішно збережено.')
73	W_1 = W_1 + alpha * layer_0.T.dot(layer_1_delta)		
		102	# кінець функції traininng_ANN
74		103	
75	# закриття файлу даних Excel	104	# паралельне навчання ансамблю НМ
76	Training_Data.close()	105	# навчання ANN_A
77		106	traininng_ANN("A", 100, alpha)
78	# запис у файл даних	107	# навчання ANN_B1
79	# результатів навчання –	108	traininng_ANN("B1", 600, alpha)
80	# матриці ваг W_1 та W_2 для ANN_ID	109	# навчання ANN_B2
81	data_path = join('.', 'Data', "weights_matrix_1_"+ANN_ID+".txt")	110	traininng_ANN("B2", 600, alpha)
		111	print('Завершення програми.')
82	data_path = abspath(data_path)	112	input()

3.4. Алгоритм прогнозування за допомогою навченого ансамблю моделей

Після навчання кожної нейронної мережі в ансамблі, прогнозування емпіричного коефіцієнта Шезі для нових, невідомих даних здійснюється шляхом агрегування (злиття) прогнозів від усіх моделей НМ [19, 21]. Для цього пропонується використовувати модифікований метод голосування на основі вирішення зворотної задачі. Ідея такого підходу передбачає: 1) визначення прогнозів для кожного учасника ансамблю, 2) розглядається зворотна задача (8), (9) з метою встановлення (вибору, голосування) в якості остаточного результату прогнозування тільки тієї оцінки певної НМ, яка найкраще відповідає вхідним умовам ансамблю. Реалізація основних методів алгоритму прогнозування коефіцієнта Шезі за допомогою ансамблю штучних нейронних мереж на Python представлена в табл. 3, 4, 5 (ініціалізація параметрів НМ, масивів даних та збереження результатів прогнозування не наводяться) та у модулі *C_EANN_calculating.py* в репозиторії Github [48].

Алгоритм прогнозування:
1. Вхід: набір нових вхідних даних $X = (x_1, x_2, x_3)$ для прогнозування.
2. Завантаження натренованих матриць вагових коефіцієнтів для нейронних мереж ANN-A, ANN-B1, ANN-B2.
3. Для кожного прикладу (x_1, x_2, x_3) з набору даних X виконується (табл. 3):

3.1. За допомогою основної НМ ANN-A обчислюється в першому наближенні значення коефіцієнта Шезі C_A згідно з обчислювальною моделлю (5).

3.2. За допомогою НМ ANN-B1 обчислюється величина уточнення φ_{B1} на основі (2), (3), (6) та визначається згідно з (1), (3) наближене значення коефіцієнта Шезі $\tilde{C}_{B1}$.

3.3. За допомогою НМ ANN-B2 обчислюється величина уточнення φ_{B2} на основі (2), (4), (6) та визначається згідно з (1), (4) наближене значення коефіцієнта Шезі $\tilde{C}_{B2}$.

3.4. Агрегування прогнозів (табл. 4): встановлюється, яка з наближених оцінок коефіцієнта Шезі C_A, $\tilde{C}_{B1}$, $\tilde{C}_{B2}$ найкраще відповідає вектору вхідних даних (x_1, x_2, x_3), де $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$, $x_2 \in \{h, R\}$, $x_3 = V$; для кожного з індивідуальних прогнозів розглядається зворотна задача на основі умови:

$$\left|\tilde{V}_k - V\right| \to min,\ k = \overline{1,3}, \tag{8}$$

де V – еталонне значення швидкості водного потоку відповідно до гідрологічних даних, що подаються на вхід ансамблю нейронних мереж, $\tilde{V}_1 = \tilde{V}(C_A)$, $\tilde{V}_2 = \tilde{V}(\tilde{C}_{B1})$, $\tilde{V}_3 = \tilde{V}(\tilde{C}_{B2})$, $\tilde{V}$ – наближене значення швидкості водного потоку, що визначається відповідно до даних гідрологічних спостережень на основі формули Шезі [1-3, 31]:

$$\tilde{V} = \tilde{C}\sqrt{RS_f}, \tag{9}$$

де $\tilde{C}$ – наближені значення коефіцієнта Шезі, які в нашому випадку є множиною індивідуальних прогнозів C_A, $\tilde{C}_{B1}$, $\tilde{C}_{B2}$ відповідних НМ, R – гідравлічний радіус (м), $R \cong h$ при $B \gg h$, B – середня ширина потоку (м), h – середня глибина потоку (м), S_f – ухил поверхні води.

Остаточний результат прогнозування ансамблю нейронних мереж $\tilde{C}(X)$ обирається серед індивідуальних прогнозів коефіцієнта Шезі C_A, $\tilde{C}_{B1}$, $\tilde{C}_{B2}$ (табл. 5), для якого виконується умова (8).
4. Збереження результатів прогнозування у окремому файлі даних.

Таблиця 3. Реалізація алгоритму прогнозування в Python. Блок методу обчислення прогнозів нейронних мереж

№	Програмний код	№	Програмний код
1	import openpyxl	32	
2	import numpy as np	33	for i in range(len(raw_matrix1)):
3	from openpyxl import Workbook	34	b = raw_matrix1[i]
4	from openpyxl.styles import Alignment, PatternFill, Font	35	a = b.split(' ')
		36	for j in range(len(raw_matrix2)):
5	from os.path import join, abspath	37	W_1[i][j] = float(a[j])
6		38	for i in range(len(raw_matrix2)):
7	# стандартна логістична ф-ія активації	39	W_2[i] = float(raw_matrix2[i])

```
8   def logistic(x):
9       return 1.0 / (1 + np.exp(-x))
10
11  # * функція для обчислення прогнозів ШНМ *
12  def calculating_ANN(ANN_ID):
13
14      # зчитування матриць вагових коефіцієнтів
15      data_path = join('.', 'Data',
        "weights_matrix_1_"+ANN_ID+".txt")
16      data_path = abspath(data_path)
17      f = open(data_path)
18      raw_matrix1 = f.readlines()
19      f.close()
20      data_path = join('.', 'Data',
        "weights_matrix_2_"+ANN_ID+".txt")
21      data_path = abspath(data_path)
22      f = open(data_path)
23      raw_matrix2 = f.readlines()
24      f.close()
25
26      # ініціалізація вектора виходів НМ
27      output_ANN =
        np.zeros(shape=(max_row_data))
28
29      # ініціалізація матриць W_1 і W_2
30      W_1 = np.zeros(shape=(input_size,
        hidden_size))
31      W_2 = np.zeros(shape=(hidden_size,
        output_size))
40
41  # відслідковування похибки
42      if (len(raw_matrix1) == input_size) and
        (len(raw_matrix2) == hidden_size):
43          param_matching = 0
44          print('Вхідні дані для ANN_' + ANN_ID +
            ' відповідають параметрам матриць ваг
            ШНМ,')
45      else:
46          param_matching = 1
47          print('Вхідні дані не відповідають
            параметрам матриць ваг ШНМ.')
48
49      # обчислення виходів мережі
50      if param_matching == 0:
51          for i in range(max_row_data):
52              # прямий хід обчислень
53              layer_0 = characteristics_riverbed[i:i + 1]
54              layer_1 = logistic(np.dot(layer_0, W_1))
55              layer_2 = np.dot(layer_1, W_2)
56              output_ANN[i] = layer_2[0][0]
57              print('для набору вхідних параметрів
                №', i + 1, ', обчислений вихід ANN_'+ANN_ID+
                ' = ', output_ANN[i])
58
59      return  output_ANN
60  # * кінець функції calculating_ANN *
```

Таблиця 4. Реалізація алгоритму прогнозування в Python. Блок методу агрегування прогнозів нейронних мереж

```
61  def aggregation_C(C, C1, C2, Q, B, H, Sf):
62      # аналіз прогнозів C_A, C_B1, C_B2 та
63      # встановлення найкращого з них
64      # (зворотна задача (8), (9))
65
66      delta_V = np.zeros(shape=(3))
67  # еталонна швидкість потоку V(Q)
68      V_Q = Q / (B * H)
69  # наближена швидкість V(C_A),
70      V = C * (H * Sf) ** 0.5
71      V1 = C1 * (H * Sf) ** 0.5 # шв. V(C_B1)
72      V2 = C2 * (H * Sf) ** 0.5 # шв. V(C_B2)
73
74      # обчислення відхилення від еталону
75      delta_V[0] = abs(V_Q - V)
76      delta_V[1] = abs(V_Q - V1)
77      delta_V[2] = abs(V_Q - V2)
78
79      # встановлення мінімального відхилення
80      min_delta = delta_V[0]
81      min_ind = 0
82      for i in range(1,3):
83          if min_delta > delta_V[i]:
84              min_delta = delta_V[i]
85              min_ind = i
86
87      # обирається вихід нейронної мережі
88      # з мінімальним відхиленням
89      # від еталонного значення V(Q)
90      if min_ind == 0: return C/100 # вихід = C_A
91      if min_ind == 1: return C1/100 # вихід = C_B1
92      if min_ind == 2: return C2/100 # вихід = C_B2
```

Таблиця 5. Реалізація алгоритму прогнозування в Python. Блок обчислення остаточного прогнозу ансамблю нейронних мереж

```
93  # обчислення прогнозів навчених ШНМ
94  # ANN_A, ANN_B1, ANN_B2
95  coef_C_A = calculating_ANN("A")
96  coef_delta1 = calculating_ANN("B1")
97  coef_delta2 = calculating_ANN("B2")
104 # агрегування прогнозів НМ
105 # (розглядається зворотна задача)
106
107 for i in range(max_row_data):
108
```

```
98
99   # обчислення значень коефіцієнта Шезі
100  # з врахуванням прогнозів НМ
101  for i in range(max_row_data):
102      coef_C_B1[i] = coef_C_A[i] +
     coef_delta1[i]
103      coef_C_B2[i] = coef_C_A[i] -
     coef_delta2[i]
109      # встановлення остаточних значень
110      # коефіцієнта Шезі C
111      coef_C[i] = aggregation_C(coef_C_A[i]*100,
     coef_C_B1[i]*100, coef_C_B2[i]*100, Q[i], B[i],
     H[i], Sf[i])
112
113      print('coef_C[', i, '] = ', coef_C[i])
```

3.5. Про матеріали для апробації обчислювального алгоритму

Точність оцінювання коефіцієнта Шезі значною мірою залежить від достовірності та точності вимірювань відповідних гідроморфологічних параметрів відкритих руслових потоків [30, 31].

Для апробації запропонованого обчислювального алгоритму використовуються польові гідравлічні та морфометричні дані, що стосуються окремих ділянок гірських річок (табл. 6): Тиса (м. Рахів), Тересва (с. Усть-Чорна), Латориця (с. Підполоззя), Опір (м. Сколе), Ріка (с. Міжгір'я), Чорний Черемош (с. Верховина). Ці матеріали також використані для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі на основі нейронних мереж в дослідженні [32], в якому описані особливості предметної області та обмеження параметрів для вказаних ділянок річок. Дані містять вимірювання, що характеризуються різноманітними умовами гідравлічного опору. Набір даних включає:

1) морфометричні характеристики русла: середні ширина B та глибина h потоку (м), площа поперечного перерізу A (м^2), гідравлічний радіус R (м), $R \cong h$ при $B \gg h$;

2) гідравлічні характеристики потоку: середня швидкість потоку $V = Q/A$ (м/с), витрата води Q (м^3/с), ухил водної поверхні S_f;

3) характеристики шорсткості русла: середній діаметр частинок $d = \Delta$ (м) дна і берегів, ступінь шорсткості (коефіцієнт шорсткості Гоклера-Меннінга n (с/м$^{1/3}$));

4) виміряні значення коефіцієнта Шезі C_o (м$^{1/2}$/с) для відповідних умов.

Таблиця 6. Гідроморфологічні дані про характеристики гірських річок, використані для навчання та тестування ансамблю ШНМ

Річка, ділянка русла	Q (м^3/с)	A (м^2)	B (м)	h (м)	$S_f \cdot 10^3$	d (м)	n (с/м$^{1/3}$)	C_o (м$^{1/2}$/с)
Тиса, Рахів (навчання)	197	70,38	46,85	1,5	0,0055	0,123	0,0344	28,39
	281	89,74	50,6	1,76	0,0055	0,123	0,0344	29,93
	318,33	98,59	52,26	1,88	0,0055	0,123	0,0344	30,49
Тиса, Рахів (тестування)	225	76,47	48,1	1,59	0,0055	0,123	0,0344	29,08
Латориця, Підполоззя (навчання)	135	55,01	49,66	1,10	0,008	0,142	0,0364	25,80
	156	60,10	51,33	1,16	0,008	0,142	0,0364	26,61
	248	80,26	53,73	1,48	0,008	0,142	0,0364	27,58
	319	95,33	54,46	1,74	0,008	0,142	0,0364	27,74

Проловження таблиці 6

Річка, ділянка русла	Q (м^3/с)	A (м^2)	B (м)	h (м)	$S_f \cdot 10^3$	d (м)	n (с/м$^{1/3}$)	C_o (м$^{1/2}$/с)
Латориця, Підполоззя (тестування)	114	49,92	48	1,04	0,008	0,142	0,0364	24,99
	177	65,19	53	1,23	0,008	0,142	0,0364	27,42
Опір, Сколе (навчання)	168,5	68,14	44,58	1,525	0,006	0,13	0,035	23,76
	218,5	80,82	47,31	1,70	0,006	0,13	0,035	25,44
	320,5	100,3	50,5	1,975	0,006	0,13	0,035	27,59
Опір, Сколе (тестування)	410	116,6	53	2,2	0,006	0,130	0,035	29,33
Ріка, Міжгір'я (навчання)	178,66	75,72	58,06	1,29	0,005	0,133	0,0366	27,29
	210,33	85,14	59,93	1,41	0,005	0,133	0,0366	28,16
	273	100,76	62	1,62	0,005	0,133	0,0366	29,83
Ріка, Міжгір'я (тестування)	242	94,55	61,8	1,53	0,005	0,133	0,0366	29,04
	304	106,98	62,2	1,72	0,005	0,133	0,0366	30,62
Чорний Черемош, Верховина (навчання)	205,5	79,32	56,25	1,41	0,0075	0,251	0,0373	26,1
	227,5	83,02	57,25	1,45	0,0075	0,251	0,0373	26,7
	288	96,47	60,25	1,59	0,0075	0,251	0,0373	27,25
Чорний Черемош, Верховина (тестування)	343	108,99	63	1,73	0,0075	0,251	0,0373	27,65

Підготовка та обробка цих даних є критично важливими для забезпечення якості навчання та валідації ансамблевої моделі (1)-(9). Формування даних входів ансамблю нейронних мереж (x_1, x_2, x_3), навчальних і тестових прикладів (x_1, x_2, V, C_o) $(x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\},\ x_2 \in \{h, R\},\ x_3 = V)$ передбачало побудову інформативних, згладжених, неперервних, нормованих масивів вхідних даних з врахуванням статистичної невизначеності (похибки, пропуски вимірів тощо). Зокрема, на етапі дослідження предметної області, збору та аналізу польових даних про характеристики ділянок річок вилучались з розгляду аномальні і неповні набори даних. Такий підхід сприяє точності прогнозування коефіцієнта Шезі, як це показано за результатами досліджень [31, 32].

4. Результати та їх аналіз

Пропонуються результати апробації розробленого обчислювального алгоритму (табл. 7) на реальних гідрологічних даних (табл. 6). Аналіз включає порівняння прогнозів ансамблевої моделі з фактичними виміряними значеннями коефіцієнта Шезі. Для кількісної оцінки ефективності моделі використані такі метрики, як абсолютна похибка (АП; відносна похибка, ВП) та коефіцієнт Неша-Сатклiффа (NSE).

Процедура тестування ансамблю нейронних мереж полягала у порівнянні спостережуваних Q_o і прогнозованих Q_p витрат води. При цьому Q_p визначалась за допомогою коефіцієнта Шезі C_p, обчисленого за допомогою ансамблевої моделі (1)-(9) (табл. 7) [1-3, 32]:

$$Q_p = C_p A\sqrt{RS_f}. \tag{10}$$

Для оцінки навичок прогнозування ансамблевої моделі використовувався коефіцієнт ефективності моделі Неша-Сатклiффа (NSE) [32, 49]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k}(Q_{oi}-Q_{pi})^2}{\sum_{i=1}^{k}(Q_{oi}-\bar{Q}_o)^2}, \tag{11}$$

де Q_{oi} та Q_{pi} – спостережувані та прогнозні значення витрати води на i-й ділянці русла річки, i = 1, ..., k; k – кількість отриманих результатів; $\bar{Q}_o$ – середнє спостережуваних значень витрати води. Вважають, модель з більшою прогностичною здатністю має значення NSE ближче до 1.

Таблиця 7. Результати тестування обчислювального алгоритму ансамблевої нейронної мережі

Річка, ділянка русла	Коефіцієнт шорсткості Шезі C (м$^{1/2}$/с)		Витрата води (м^3/с)		АП (м^3/с)	ВП (%)
	Оцінка C_o за (7)	Прогноз C_p	Виміри, Q_o	Прогноз, Q_p		
Латориця, Підполоззя	25,04	25,5430	114	116,31	2,3	2,0
Латориця, Підполоззя	27,37	27,5534	177	178,18	1,2	0,7
Тиса, Рахів	31,46	29,5386	225	211,26	13,7	6,1
Ріка, Міжгір'я	29,26	29,5387	242	244,29	2,3	0,9
Ріка, Міжгір'я	30,64	29,5389	304	293,06	10,9	3,6
Чорний Черемош, Верховина	27,63	27,5535	343	342,07	0,9	0,3
Опір, Сколе	30,61	29,5392	410	395,72	14,3	3,5

Запропонована ансамблева модель демонструє кращу точність та стабільність прогнозів порівняно з індивідуальними нейронними мережами, що є типовою перевагою методу Bagging. Зокрема, у попередньому дослідженні [32] за результатами застосування індивідуальної нейронної мережі для обчислення коефіцієнт Шезі на основі польових даних про характеристики гірських річок показано, що NSE = 0,939, відносні похибки прогнозованих значень витрати води Q_p коливались в межах 0,3% ÷ 12,4%. В цьому дослідженні для ансамблю нейронних мереж отримано NSE = 0,991, відносні похибки обчислених прогнозів знаходяться в межах 0,3% ÷ 6,1%.

На нашу думку, отримано досить хороші результати застосування ансамблю нейронних мереж для прогнозування коефіцієнта шорсткості Шезі, що спонукають до подальших досліджень. Зокрема, планується провести аналіз чутливості запропонованого ансамблю нейронних мереж до варіацій вхідних параметрів та дослідити його здатність до узагальнення на синтетичних даних. Також маємо намір розглянути вплив кількості нейронних мереж в ансамблі та архітектури окремих мереж на загальну ефективність.

5. Висновки

Результати показують, що запропонована обчислювальна модель для прогнозування емпіричного коефіцієнта гідравлічного опору Шезі для відкритих русел на основі ансамблевого навчання трьох нейронних мереж дозволяє отримати прогнози з достатньою для практики точністю та зменшити похибки у порівнянні з індивідуальною моделлю нейронної мережі, яка була апробована в [31, 32]. Зокрема, для гідроморфологічних умов гірських річок відносні похибки прогнозів отримано в межах 0,3% ÷ 6,1%, коефіцієнт ефективності моделі Неша-Сатклiффа = 0,991. Використання методу Bagging та агрегування прогнозів (на основі оберненої задачі) значно підвищує надійність та узагальнюючу здатність моделі. Цей підхід є перспективним для застосування в гідравлічному моделюванні та управлінні водними ресурсами, зокрема, математичному моделюванні річкових потоків для оцінки ерозійних процесів і руслових деформацій, проєктування річкових берегозахисних споруд, прогнозування наслідків паводків і затоплень [10].

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Sturm, T.W. (2001). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, N.Y., 493 p.
2. Chow, V.T. (1959). Open-channel hydraulics. N.Y., McGraw-Hill, 680 p.
3. French, R.H. (1986). Open-channel hydraulics. N.Y., McGraw-Hill, 705 p.
4. Coon, W.F. (1998). Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks. Prepared in cooperation with the New York State Department of Transportation, 133 p.
5. De Wrachien, D., Mambretti, S., and Sole, A. (2010). Mathematical models in flood management: overview and challenges. WIT Trans. on Ecology and the Environment, Vol. 133. Flood Recovery, Innovation and Response, 61–72; doi:10.2495/FRIAR100061
6. Stefanyshyn, D.V., Korbutiak, V.M., Stefanyshyna-Gavryliuk, Y.D. (2019). Situational predictive modelling of the flood hazard in the Dniester river valley near the town of Halych. Environmental safety and natural resources, 1(29), 16–27; doi:10.32347/2411-4049.2019.1.16-27
7. Ponce, V.M., Taher-shamsi, A., and Shetty, A.V. (2003). Dam-Breach Flood Wave Propagation Using Dimensionless Parameters. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 129, Issue 10, 777–782; DOI:10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:10(777)
8. Wang, Yu., Liang, Q., Kesserwani, G., and Hall, J.W. (2011). A 2D shallow flow model for practical dam-break simulations. Journal of Hydraulic Research, 49:3, 307–316; DOI: 10.1080/00221686.2011.566248
9. Julien, P.Y. (2002). River Mechanics. Cambridge University Press, UK, 456 p.
10. Khodnevich, Y.V., and Stefanyshyn, D.V. (2014). Mathematical modelling the conditions of intensification of the riverbed local erosion behind of obstacle that deviates from the shore downstream. Zeszyty Naukowe Inżynieria Lądowa i Wodna w Kształtowaniu

Środowiska, Nr 10, Kalisz, 7–18. Available from https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-journal-2082-6702-zeszyty_naukowe__inzynieria_ladowa_i_wodna_w_ksztaltowaniu_srodowiska
11. Cao, Z. and Carling, P. A. (2002). Mathematical modelling of alluvial rivers: reality and myth. Part I: General review. Proc. of the Institution of Civil Engineers Water & Maritime Engineering, 154, Issue 3, 207–219.
12. Julien, P.Y. (2010). Erosion and sedimentation. Cambridge University Press, 371 p.
13. Two-Dimensional Hydraulic Modeling for Highways in the River Environment. Ref. Document. (2019). Publ. No. FHWA-HIF-19-061, U.S. Department of Transportation, FHWA, 301 p. Available from https://portal.ct.gov/-/media/DOT/documents/ddrainage/2-D-Hydraulic-Modeling-Reference-Document.pdf.
14. Park, I., Song, Ch.G. (2018). Analysis of two-dimensional flow and pollutant transport induced by tidal currents in the Han River. Journal of Hydroinformatics, 20 (3): 551–563; https://doi.org/10.2166/hydro.2017.118.
15. The UN-Water Status Report on the Application of Integrated Approaches to Water Resources Management. (2012). Nairobi, Kenya, 119 p. Available from https://www.un.org/waterforlifedecade/ pdf/un_water_status_report_2012.pdf
16. Riverine Ecosystem Management. Science for Governing Towards a Sustainable Future. (2018). Schmutz, S., and Sendzimir, J., Editors. Aquatic Ecology Series. Volume 8. Springer Open, 562 p.
17. Kasvi, E., Alho, P., Lotsari, E., Wang, Y., Kukko, A., Hyyppä, H., and Hyyppä, Yu. (2014). Two-dimensional and three-dimensional computational models in hydrodynamic and morphodynamic reconstructions of a river bend: sensitivity and functionality. Hydrological Processes, Pub. online in Wiley Online Library; DOI: 10.1002/hyp.10277
18. Cha Zhang (2012). Ensemble Machine Learning: Methods and Applications. Published by Springer, 340 p.
19. Gautam Kunapuli (2023). Ensemble Methods for Machine Learning. Published by Manning, 352 p.
20. Giovanni Seni, John Elder (2010). Ensemble Methods in Data Mining: Improving Accuracy Through Combining Predictions. Morgan and Claypool Publishers, 126 p.
21. Mohammed, A., and Kora, R. (2023). A comprehensive review on ensemble deep learning: Opportunities and challenges. Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences, 35, 757-774. https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.01.014
22. Rokach, L. (2010). Ensemble-based classifiers. Artificial Intelligence Review, 33, 1–39. https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-009-9124-7
23. Rokach, L. (2019). Ensemble Learning: Pattern Classification Using Ensemble Methods. World Scientific Publishing Company, 300 p.
24. Thomas A. Dorfer (2023). Bagging vs. Boosting: The Power of Ensemble Methods in Machine Learning. https://pub.towardsai.net/bagging-vs-boosting-the-power-of-ensemble-methods-in-machine-learning-6404e33524e6
25. Zhi-Hua Zhou (2012). Ensemble Methods: Foundations and Algorithms. Chapman & Hall/CRC Machine Learning & Pattern Recognition, 236 p.
26. Soft Computing: Recent Advances and Applications in Engineering and Mathematical Sciences. (2023). Edited by P. Debnath, O. Castillo, and P. Kumam. CRC Press. Taylor & Francis Group, London, N.Y., 233 p.
27. Bao-fei Feng, Yin-shan Xu, Tao Zhang, Xiao Zhang (2022). Hydrological time series prediction by extreme learning machine and sparrow search algorithm. Water Supply 22 (3), 3143–3157; https://doi.org/10.2166/ws.2021.419
28. Li, S., & Yang, J. (2023). Improved river water-stage forecasts by ensemble learning. Engineering with Computers, 39, 3293–3311; DOI: 10.1007/s00366-022-01751-1
29. Zounemat-Kermani, M., Batelaan, O., Fadaee, M., Hinkelmann, R. (2021). Ensemble machine learning paradigms in hydrology: A review. Journal of Hydrology, Vol. 598; https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126266

30. Stefanyshyn, D. V., Khodnevich, Y. V., Korbutiak, V. M. (2021). Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcoming. Environmental safety and natural resources, 39 (3), 16–43. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43
31. Yaroslav V. Khodnevych, Dmytro V. Stefanyshyn (2022). Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chezy roughness coefficient under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels. Environmental safety and natural resources, Vol. 42 № 2, 59-85. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.59-85
32. Khodnevych, Y., Stefanyshyn, D., Korbutiak, V. (2023). The Chezy Roughness Coefficient Computing Using an Artificial Neural Network to Support the Mathematical Modelling of River Flows. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_26
33. Yaroslav Khodnevych, Dmytro Stefanyshyn (2023). Do we need a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute roughness coefficient? Environmental safety and natural resources, Vol. 48 (4), 170–182. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.170-182
34. Ahmed Fawzy Gad, Fatima Ezzahra Jarmouni (2021). Introduction to Deep Learning and Neural Networks with Python. A Practical Guide - 2021 Elsevier Inc. 285 p.
35. Brett Slatkin (2019). Effective Python. Addison-Wesly. 469 p.
36. Chollet, F. (2018). Deep Learning with Python. Manning Publications Co., 384 p.
37. George Kyriakides, Konstantinos G. Margaritis (2019). Hands-On Ensemble Learning with Python. Packt Publishing, 298 p.
38. Muller, A., and Guido, S. (2016). Introduction to Machine Learning with Python. Published by O'Reilly Media, 378 p.
39. Sebastian Raschka, Vahid Mirjalili (2017). Python Machine Learning. Packt Publishing Ltd. 622 p.
40. Altman, M. (2020). A holistic approach to empirical analysis: The insignificance of P, hypothesis testing and statistical significance. In D.H. Bailey, N.S. Borwein, R.P. Brent, R.S. Burachik, J.H. Osborn, B. Sims, and Q.J. Zhu (Eds.). From Analysis to Visualization: A Celebration of the Life and Legacy of J.M. Borwein, Callaghan, Australia, September 2017. Springer Verlag. Vol. 313, 233–253; https://doi.org/10.1007/978-3-030-36568-4_16
41. Vyshnevskyi, V. I., Kosovets, O. O. (2003). Hydrological Characteristics of the Rivers of Ukraine. Kyiv: Nika-Center, 324 p. (in Ukrainian). [В.І. Вишневський, О.О. Косовець (2003). Гідрологічні характеристики річок України. К.: Ніка-Центр, 324 с.].
42. Berthold, M.R., Borgelt, Ch., Höppner. F., and Klawonn, F. (2010). Guide to Intelligent Data Analysis: How to Intelligently Make Sense of Real Data. London: Springer-Verlag, 407 p.; DOI:10.1007/978-1-84882-260-3
43. De Rocquigny, E. (2012). Modelling Under Risk and Uncertainty: An Introduction to Statistical, Phenomenological and Computational Methods. Wiley series in probability and statistics, 484 p.
44. Kochenderfer, M.J. (2015). Decision-making under uncertainty. Theory and Application. With Ch. Amato, G. Chowdhary, J.P. How, H.J. Davison Reynolds, J.R. Thornton, P.A. Torres-Carrasquillo, N. Kemal Üre, and J. Vian. Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 323 p.
45. Trofymchuk, O.M, Bidiuk, P.I., Prosiankina-Zharova, T.I., Terentiev, O.M. (2019). Decision support systems for modelling, forecasting and risk estimation. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing, 176 p.
46. Choi, R.Y., Coyner, A.S., Kalpathy-Cramer, J., Chiang, M.F., and Campbell, J.P. (2020). Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning. Trans Vis Sci Tech., Special Issue, Vol. 9, No. 2, Article 19:2, https://doi.org/10.1167/tvst.9.2.14

47. Haikin, S. (2008). Neural Networks and Learning Machines (3rd Edition). Prentice Hall, 906 p.
48. Khodnevych, Ya. (2025). Software Implementation of a Computational Algorithm for Training an Ensemble of Neural Networks to Predict the Chezy Roughness Coefficient. Available from https://github.com/yakhodnevych/ANNE_approximation_C.git
49. Gichamo, T., Nourani, V., Gökçekuş, H., Gelete, G. (2024). Ensemble of artificial intelligence and physically based models for rainfall–runoff modeling in the upper Blue Nile Basin. Hydrology Research, 55 (10): 976–1000. https://doi.org/10.2166/nh.2024.189

Стаття надійшла до редакції 03.06.2025 і прийнята до друку після рецензування 22.08.2025

The article was received 03.06.2025 and was accepted after revision 22.08.2025

Ходневич Ярослав Васильович
кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-5510-1154 ***e-mail**:* ya.v.khodnevych@gmail.com

Корбутяк Василь Михайлович
кандидат технічних наук, доцент кафедри землеустрою, кадастру, моніторингу земель та геоінформатики Національного університету водного господарства та природокористування
Адреса робоча: 33028 Україна, м. Рівне, вул. Соборна, 11
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8273-2306 ***e-mail**:* v.m.korbutiak@nuwm.edu.ua

УДК 004.6; 556.5

Yevhen Nasiedkin[1,3], PhD, (Geol.), Senior Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2633-9291 ***e-mail:*** nasedevg@ukr.net

Ruslan Havryliuk[2,3], Candidate of Geological Sciences, Scientific Secretary (Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine), Head (National Ecological Center of Ukraine)
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6465-9440 ***e-mail:*** gavrilyuk.ruslan@gmail.com

Serhii Fedoseienkov[1], PhD (Geol.), Senior Researcher, Deputy Director for Scientific and Technical Work
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9576-2977 ***e-mail:*** 22lex22s@ukr.net

Svitlana Nevierova[1], Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-7472-4776 ***e-mail:*** sidzp2019@gmail.com

Svitlana Stadnichenko[2], PhD (Geol.), Leading Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1038-6878 ***e-mail:*** stadnichenkosm@gmail.com

Denis Zemskyi[2], Researcher
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-3041-4034 ***e-mail:*** Denua@yahoo.com

[1]State Scientific Institution "Center for Problems of Marine Geology, Geoecology and Sedimentary Ore Formation of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
[3]National Ecological Center of Ukraine, Kyiv, Ukraine

SOME RESULTS OF RESEARCH ON RIVER SUSPENDED SEDIMENTS OF THE DNIPRO AND THE DANUBE

Abstract. *The aim of the study was to identify the patterns of distribution of the material composition of suspended sediments in the lower sections of the basins of Ukraine's largest rivers – the Dnipro and the Danube. Determining the qualitative characteristics of suspended sediments, in combination with quantitative indicators from state monitoring data, is a promising approach for developing an information base on their overall condition and distribution. Analysis of the obtained data will contribute to understanding the ecological processes occurring in surface watercourses and their impact on the environment and human activities. Continuity of such research and the formation of long-term data series make it possible to substantiate predictive indicators, assess both short-term and long-term environmental impacts, and provide a reliable foundation for planning and implementing activities aimed at restoring the natural state of river systems and the adjacent marine areas within their zone of influence. The implementation of such comprehensive studies of the qualitative and quantitative characteristics of the substance of water flows, in addition to obtaining new knowledge about natural and man-made factors of river flow formation and creating databases for relevant forecasts, will bring Ukraine closer to the European observation system and will allow for strengthening interstate cooperation in the future.*
Keywords: *Dnipro, Danube, Kakhovka Reservoir, lithodynamic processes, sediments, heavy metals, microplastics, geoecology, monitoring.*

© Є.І. Насєдкін, Р.Б. Гаврилюк, С.Г. Федосеєнков, С.І. Невєрова, С.М. Стадніченко, Д.В. Земський, 2025

Є.І. Насєдкін[1,3], Р.Б. Гаврилюк[2,3], С.Г. Федосеєнков[1], С.І. Невєрова[1], С.М. Стадніченко[2], Д.В. Земський[2]

[1]Державна наукова установа «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України», м. Київ, Україна
[2]Інститут геологічних наук НАН України, м. Київ, Україна
[3]Національний екологічний центр України, м. Київ, Україна

ДЕЯКІ РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ РІЧКОВОЇ ЗАВИСІ ДНІПРА ТА ДУНАЮ

Анотація. *У статті представлено результати досліджень річкової зависі в нижніх ділянках басейнів найбільших річок України – Дніпра та Дунаю. Визначення якісних характеристик завислих седиментів в комплексі із залученням кількісних показників державного моніторингу є перспективним для створення інформаційної бази щодо їх комплексного стану та розподілу. Аналіз таких масивів накопичених даних може наблизити до розуміння літодинамічних та екологічних процесів, що відбуваються в поверхневих водотоках, та їх впливу на довкілля і людину. Безперервність таких досліджень та формування тривалих часових рядів даних – головна запорука формування прогнозних показників, визначення як короткочасних, так і довгострокових різнохарактерних впливів та ризиків при плануванні й розробці заходів з відновлення природного стану та сталого існування поверхневих водойм.*

Ключові слова: *Дніпро, Дунай, Каховське водосховище, літодинамічні процеси, седименти, важкі метали, мікропластик, геоекологія, моніторинг.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.174-185

Вступ

Значного антропогенного впливу, що суттєво посилився та ускладнився внаслідок повномасштабної російської військової агресії, зазнали річки України. Війна призводить як до пікових сплесків екологічного лиха, таких як знищення Каховського водосховища, так і до посилення чинників тривалого негативного впливу, зокрема збільшення господарського навантаження на акваторію нижнього Дунаю. Протягом війни посилюються також екологічні впливи, що визначаються акумулятивним характером та тривалою дією на складові не тільки річкових, але й морських екосистем в зонах їх взаємодії. Головною причиною такого впливу є зміни гідрологічного та гідрохімічного режиму стоку великих водних артерій, зокрема Дніпра та Дунаю, що в кінцевому рахунку призводить до трансформації седиментаційних та літодинамічних процесів в пониззі річок та прилеглих ділянках морських акваторій з суттєвими екологічними наслідками. Своєчасне виявлення довгострокових ризиків на основі режимних спостережень – надійний фундамент для розробки чи вдосконалення існуючих заходів з контролю та відновлення екологічного стану як річкових, так і морських акваторій.

Очевидно, що інформативний моніторинг розподілу в річках та виносу в море седиментаційних потоків має передбачати інтегрування в один масив досліджень якісних та кількісних характеристик завислої речовини (суспендованих седиментів). І якщо дані щодо режимних спостережень кількісного розподілу зависі на станціях державного моніторингу наявні

у вільному доступі, то інформація про її якісні характеристики головним чином формується на основі окремих наукових досліджень. Одним із надійних практичних польових функціоналів для таких робіт може стати застосування систем безперервного відбору седиментів, зокрема на основі використання седиментаційних пасток. Об'єднання всіх функцій і властивостей седиментів, на основі даних натурного моніторингу, в цілісну модель в межах конкретних водних тіл відкриває можливість ефективної оцінки стану і управління річковими басейнами.

Метою цієї статті є встановлення закономірностей розподілу речовинного складу завислих седиментів в нижніх ділянках басейнів найбільших річок України – Дніпра та Дунаю.

Методика дослідження

На сьогодні джерелом моніторингової інформації щодо розподілу завислих речовин в річках виступають дані, отримані на гідростворах, де визначається стік завислих наносів (сумарна кількість седиментів, що переноситься через переріз певної річки за деякий проміжок часу). Така інформація присутня в базах даних, прив'язаних, зокрема, до інтерактивної карти на сайті Державного агентства водних ресурсів України – відповідні первинні дані, що представляють собою числові показники розподілу стоку завислих наносів в г/м^3, розташовано там у вільному доступі.

Виконання таких досліджень на гідростворах проводиться за умов фіксації поперечних профілів та промірних вертикалей в точках замірів, визначення швидкості течії та відбору батометром проб стоку на каламутність у три-п'ятиразовій повторності [1]. Основною проблемою таких спостережень залишається частота замірів – лише один раз на місяць – що є недостатньо інформативним показником для дослідження змін кількісних характеристик зависі в короткочасні періоди, особливо в сезонних інтервалах активних гідрологічних змін.

З метою дослідження якісної складової завислих речовин та інтеграції її з даними зазначених кількісних показників були створені пункти їх безперервного відбору з використанням седиментаційних пасток на двох ділянках найбільших річок України. Зокрема, в нижній течії річки Дніпро в межах м. Запоріжжя точка спостережень розташована на базі філіалу Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України» (функціонує з 2015 р.), а також ділянці дельти Дунаю (м. Вилкове) завдяки зусиллям Інституту геологічних наук НАН України та Національного екологічного центру України (системні дослідження розпочато з січня 2025 р.) [2, 3].

Для тривалих безперервних досліджень завислих седиментів використовуються прилади, що за класифікацією, представленою в стандарті ISO5667-17:2008, можна віднести до типу «пасивні пробовідбірники». Представляючи собою фактично один з варіантів седиментаційних пасток, що призначені для відбору проб завислих седиментів з вертикальних потоків, пасивні пробовідбірники фіксуються у воді на заданих глибинах, де вони наповнюються завислою речовиною в природних умовах її осідання. На відміну від методик короткочасового заміру вмісту зависі в воді, що,

як правило, проводяться в комплексах визначення її санітарно-екологічного стану та гідрохімічного контролю, час експозиції уловлювачів зависі складає тривалий період і підбирається відповідно до поставлених завдань, що може сягати місяць і більше.

Рисунок 1. Седиментаційні пастки: процедура зняття, седиментаційні циліндри з відібраною речовиною, основні компоненти приладу

Нижче наведено деякі порівняльні дані розподілу зависі для обох точок, отримані із залученням седиментаційних пасток за відносно невеликий часовий інтервал – 6 місяців 2025 року, що підкреслюють інформативність проведення таких спостережень на тривалій основі та доцільність їх інтеграції з даними державного моніторингу.

Результати та обговорення

Дані державного моніторингу щодо завислих речовин свідчать, що за багаторічними показниками для Дніпра в пониззі Запоріжжя (дані моніторингу 2015-2018 рр., 12 замірів) середній їх вміст складає 5,00 мг/дм^3 з незначними відхиленнями, головним чином в літні місяці, до 5,50 мг/дм^3. Пункт спостережень розташований нижче за течією від греблі Дніпровського водосховища, яке, фактично, є в каскаді штучних водойм п’ятою величезною ділянкою для акумуляції седиментів, що надходять до нього з верхів’їв річки. Такий відносно рівномірний в часі та без суттєвих перевищень нормативів розподіл завислих частинок властивий зарегульованим рівнинним річкам. Середній багаторічний показник для Дунаю у створі м. Вилкове (дані моніторингу 2004-2025 рр., 233 заміри) складає 39 мг/дм^3 при мінімальних значеннях 2,8 мг/дм^3 (січень 2004 р.) та максимальних 160 мг/дм^3 (жовтень 2017 р.) і має значні сезонні коливання в річному циклі. Дунай, на відміну від Дніпра, в нижній течії є значно менш зарегульованим, де руслові водосховища (ГЕС Залізні ворота 1 та ГЕС Залізні ворота 2, які є найбільшою системою водосховищ на Дунаї [4],) розташовані значно вище за течією і не мають безпосереднього впливу на природний розподіл седиментів в районі досліджень.

При порівнянні цих показників з інтенсивністю накопичення в седиментаційних пастках зависі для обох точок прослідковуються як певні відмінності, так і спільні риси. Для Дніпра при середньомісячному багаторічному показнику ваги сухої проби у 4 г, багаторічний показник за теплий період (друга половина травня – перша половина вересня) склав значення 6,5 г, за холодний період (друга половина листопада – перша половина березня) – 2,6 г. Максимальні значення за період досліджень спостерігались в теплий період (максимум – 12,3 г), мінімальні – в холодний (1,1 г).

Суспендовані седименти Дунаю, відібрані протягом 2025 року, в цілому мали іншу тенденцію часового розподілу і значно більші показники інтенсивності накопичення. При середньому показнику за наведений період 1200 г сухої речовини мінімальні значення відповідали зимовому періоду – 720 г, максимуми – весняним місяцям (4000 г). В графічній формі (рис. 2) це можна представити як порівняння за показниками відбору кожного місяця: Дунай – 2025 рік, Дніпро – довільний період (вибірка даних 2016 року).

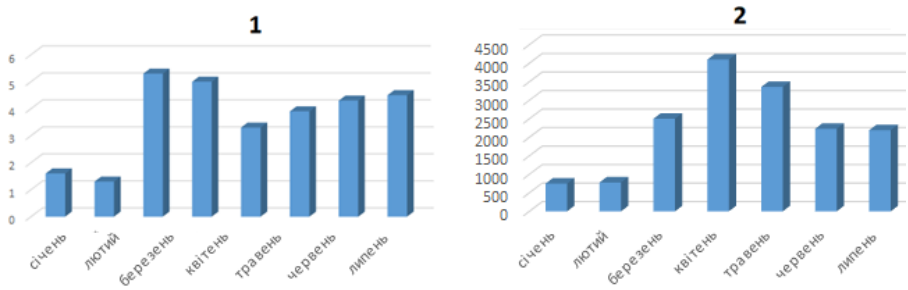


Рисунок 2. Діаграми місячних показників накопичення суспендованих седиментів в пастках: 1 – Дніпро, Запоріжжя, 2 – Дунай, Вилкове (суха речовина, г)

При суттєвих відмінностях в швидкості накопичення речовини (два порядки) простежується спільна часова тенденція зменшення її в зимові місяці і різкого збільшення на початку весни, де основним фактором, вірогідно, є водопілля.

Другим додатковим показником, що тісно пов'язаний з кількісними особливостями накопичення зависі, є гранулометричний склад. При значному обсязі даних для точки відбору в межах Запоріжжя для зависі Дунаю проведено лише два опробування, для найбільш «контрастних» місяців за інтенсивністю надходження зависі в пастки – березня (водопілля) і серпня (межень). Порівняння змін (рис. 3) в складі двох основних фракцій – дрібнодисперсної пелітової (< 0,001-0,01 мм) та більш крупної – алевритової з домішками піскової (0,01-1 мм) визначає для проб з Дунаю збільшення частки першої (51/49) для серпневої проби і зменшення для березня (44/56); для Дніпра – навпаки – 41/59 для березня і 45/55 для серпня.

При цьому осереднені багаторічні зміни щомісячних концентрацій завислих седиментів за даними Лабораторії моніторингу вод Південного регіону, пункт спостережень Вилкове, свідчать про збільшення їх вмісту вдвічі в березні в порівнянні з серпнем, відповідно 59,6/26,9 г/м^3. Для Дніпра, як вже зазначалося, вони коливаються в межах 5 г/м^3. Таким чином, на основі наявних даних можна стверджувати як про незначні зміни в гранулометричному складі

завислих речовин при різній інтенсивності накопичення в пастках та швидкості водного потоку, так і про відсутність наявного зв'язку змін концентрації завислих речовин за вимірами в рамках держмоніторингу і обсягами осілої в седиментаційних пастках речовини.

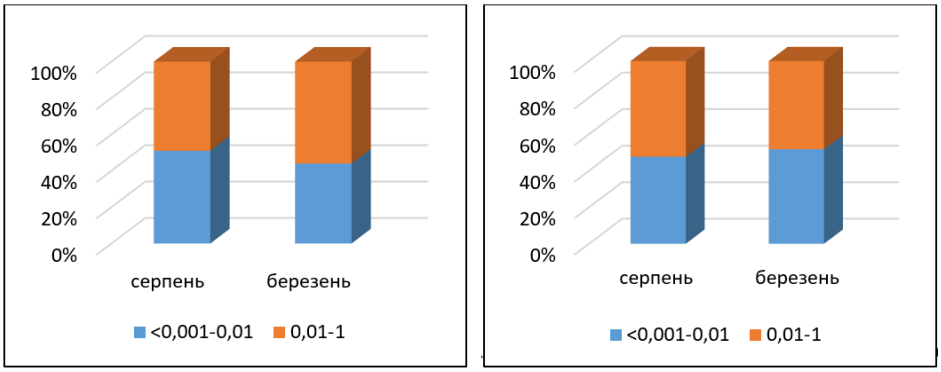


Рисунок 3. Графіки відсоткового розподілу показових фракцій розмірності завислих седиментів: 1 – Дунай, 2 – Дніпро

Додатково було проведене порівняння змін в складі основних мінеральних компонентів завислої речовини обох річок. Загалом, при достатньо значному обсязі матеріалів, накопичених за період досліджень дніпровської зависі, для проб дунайської речовини було оброблено два зразки, що представляли різні часові періоди – мінімальних обсягів накопичення в пастках (серпень) та максимального (березень). Комплексні електронно-мікроскопічні дослідження дозволили попередньо встановити морфологічні особливості завислих частинок Дніпра та Дунаю і визначити їх макрохімічний склад. Мінеральний склад визначався на основі інтерпретації морфоструктурних особливостей зерен досліджуваних зразків та результатів точкового рентгенівського мікроаналізу.

Дослідження засвідчили, що для зразків з обох річок основною утворюючою компонентою є кремнезем (SiO_2), що може перевищувати 85% в складі проби, та глинозем (Al_2O_3), максимальні значення якого сягають 8%. Також основні складові представлені фрагментами зерен кварцу, польових шпатів (калієві польові шпати, анортит), слюди (біотит) псамітової та алевритової розмірності, мікроагрегатами глинистих мінералів. Інші макрокомпоненти представлені також CaO (до 5%); K_2O (до 1%); SO_3 (до 4%).

Найбільш інформативною складовою, що має зв'язок з сезонними закономірностями осадконакопичення, можна вважати розподіл важкої фракції (головним чином оксиди заліза) та органічної складової. Для дніпровської зависі в межах індустріального осередку Запоріжжя, де більша частина оксидів заліза має техногенне походження і потрапляє в річкове середовище атмосферним шляхом [5], головним фактором накопичення є швидкість течії. Збільшення обсягів водних мас та швидкості їх переносу навесні дозволяє зменшувати в пастках кількість накопичених техногенних частинок аерозольних викидів, що надходять з визначеною промисловими циклами інтенсивністю на водну поверхню в межах шлейфів осадження.

Зокрема, за результатами мікрозондового аналізу у складі зразку за вересень вміст (%) $FeO+Fe_2O_3$ сягнув 24,95; MnO – 3,4-13,9; TiO_2 – до 2,14. Одночасно, для проби, відібраної протягом березня, теригенні мінерали важкої фракції також було представлено значною кількістю фрагментів зерен оксиду заліза від алевритової (20-30 мкм) до пелітової (2-3 мкм) розмірності, але при цьому максимальний вміст $FeO+Fe_2O_3$ не перевищував 7,35% загального складу речовини зразку, а вміст інших оксидів був менше одиниці.

Для розподілу важкої фракції в пробах завислих седиментів Дунаю спостерігається зворотна тенденція. В складі зразку, відібраного в березні та вересні (рис. 4-5), серед теригенних мінералів важкої фракції виявлено значну кількість фрагментів зерен оксиду заліза від псамітової (до 100 мкм) до пелітової (1-2 мкм) розмірності; зерна сульфату барію (до 20 мкм); циркону (20-30 мкм); ільменіту (15 мкм), а також ільменіту з пірофанітовою молекулою (MnO) розміром до 20 мкм, а також присутні фрагменти зерен сульфіду заліза алевритової розмірності (10 мкм). Серпнева проба серед теригенних мінералів важкої фракції містить одиничні фрагменти зерна ільменіту алевритової розмірності (10 мкм) та оксиду заліза. При цьому в пробі відмічається присутність певної кількості рослинного детриту (водорості) > 100 мкм.

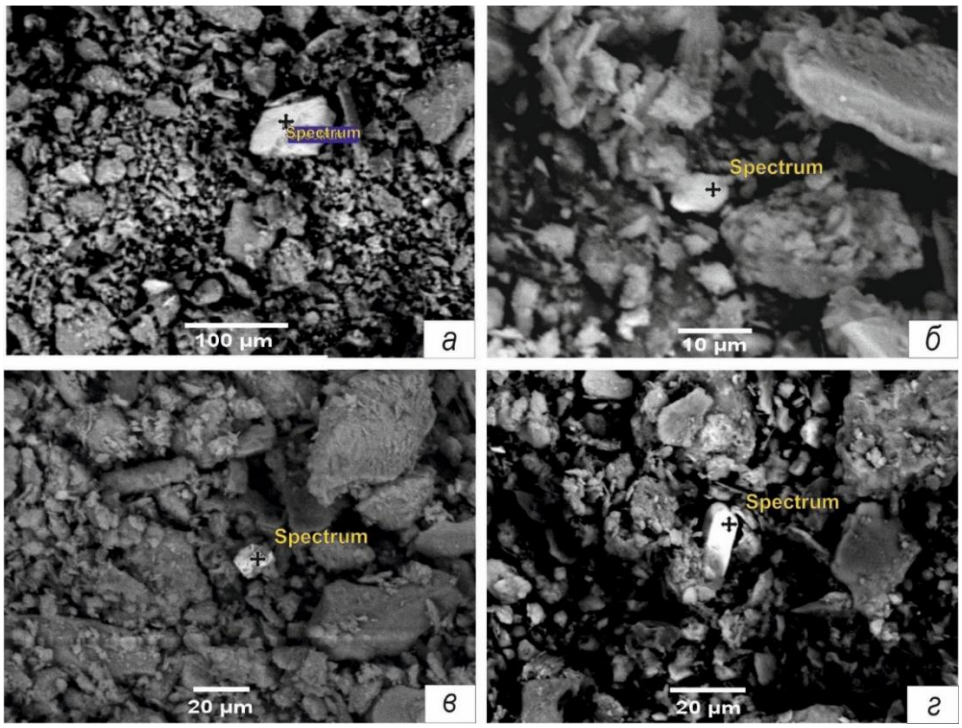


Рисунок 4. Теригенні мінерали важкої фракції завислої речовини Дунаю (березень 2025 р.). Електронно-мікроскопічні знімки: а) зерно оксиду заліза псамітової розмірності; б) фрагмент зерна оксиду заліза дрібноалевритової розмірності; в) сильнокородоване зерно бариту; г) зерно циркону

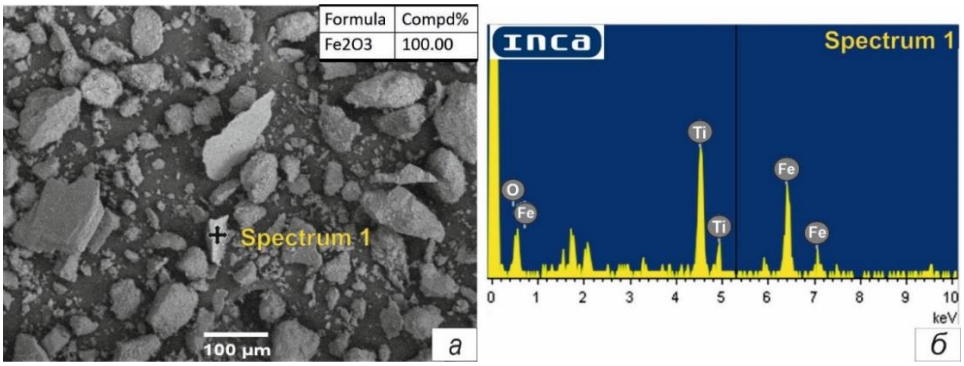


Рисунок 5. Зависла речовина Дунаю (вересень 2025 р.) – гострокутний уламок зерна ільменіту псамітової розмірності: а) електронно-мікроскопічний знімок; б) рентгенівський спектр

Зважаючи на отримані результати, можна відмітити певні тенденції розподілу важкої фракції зависі. Для Дніпра – це багаторічна особливість зменшення її вмісту в період водопілля, підтверджена тривалими дослідженнями, причини якої описано вище. Натомість для проб з Дунаю збільшення оксидів заліза та інших важких компонентів у весняний місяць максимального стоку в порівнянні з «меженним» серпнем свідчить про вплив природних умов на зміни в компонентному складі суспендованих седиментів. Вочевидь, що в першу чергу це висока швидкість течії в окремі періоди, на відміну від зарегульованого гідротехнічними спорудами Дніпра, що в комплексі з великою площею водозбірного басейну дозволяє мобілізувати в твердий потік під час повені складові більшої ваги чи розмірності.

З іншого боку, збільшення кількості і розмірності рослинного детриту для літнього періоду в пробах з Дунаю може вказувати на те, що він певним чином «займає» місце важких мінеральних фракцій в загальному компонентному складі зависі. Ця ж особливість спостерігається і для літньої проби Дніпра. Також варто звернути увагу на наявність в пробах, відібраних в Запоріжжі, суттєвої кількості фітопланктону. На відміну від проб з Дунаю, в зразках відмічається високий вміст фрагментів кремнескелетних (діатомових) водоростей, для березневої проби – тонкопсамітової розмірності (50-80 мкм), для серпневої, при збільшенні їх загального вмісту – алевритової (10-40 мкм) та дрібнопсамітової розмірності (100 мкм). В цілому це є нормальним явищем для рівнинної річки з наявним каскадом водосховищ і сповільненою течією, але слід відмітити також їх внесок в загальну кількість завислих частинок в широкому діапазоні гранулометричного складу в періоди активного розвитку фітопланктону.

В контексті отриманих даних слід зазначити, що Дунай і Дніпро не тільки найбільші постачальники в Чорне море обсягів водного стоку та завислих речовин, але й також найбільші «донори» в надходженні забруднень: важких металів, пластику та мікропластику, інших небезпечних сполук в розчиненому і завислому стані. Дані літературних джерел свідчать про значні обсяги виносу важких металів в завислій формі обома річками, які є співставними з кількісними показниками їх розчинного стоку (табл. 1) [6].

Таблиця 1. Щорічне надходження важких металів в розчинній та завислій формі зі стоком Дніпра та Дунаю в акваторію Чорного моря

	Дніпро		Дунай	
Елемент	Щорічне надходження в завислій формі (т/рік)	Щорічне надходження в розчинній формі (т/рік)	Щорічне надходження в завислій формі (т/рік)	Щорічне надходження в розчинній формі (т/рік)
Ni	105	158,9	5050	510,4
Cu	97	235,7	5890	1470,7
Zn	1050	1005,0	21150	4208,9
Pb	147	93,8	10410	308,9

Важливим аспектом наших досліджень є те, що природний баланс між розподілом кількості елементів у розчинній та завислій формі залежить від низки зовнішніх факторів: зміни кислотності середовища, розміру, складу та щільності розподілу в воді завислої речовини, а також від гідродинамічного і гідрохімічного режиму акваторії. А зависла форма міграції забруднюючих речовин обумовлюється домінуванням сорбції на частинках різного мінерального складу в обмінній формі, що підкреслює необхідність вивчення речовинного складу рухомих седиментів при проведенні моніторингу водних екосистем.

Висновки

Матеріалів, наведених в публікації, замало для формування системних висновків чи прогнозів щодо особливостей перебігу седиментаційних процесів в акваторіях Дніпра та Дунаю. Одночасно проведені на базі натурного експерименту дослідження із залученням процедури безперервного пробовідбору частинок з водного середовища седиментаційними пастками свідчать про перспективність таких робіт. Режимні спостереження за потоками завислих седиментів з перманентним відбором зразків для вивчення речовинного та гранулометричного складу, інтенсивності вертикальних потоків та перерозподілу їх основних компонентів, дослідження концентрацій та обсягів перенесення ними різноманітних забруднювачів мають значну наукову перспективу. Одночасне щомісячне визначення комплексу перелічених показників за тривалий період (більше року) та зв’язку їх з показниками кількісного розподілу дозволяє визначити низку взаємозалежностей та дійти певних висновків щодо природних та техногенних факторів формування стоку таких річок, як Дунай та Дніпро.

Слід зазначити, що європейськими країнами з різним успіхом в стані реалізації таких завдань впроваджуються відповідні системи моніторингу седиментів. При цьому увага приділяється не тільки показникам розподілу наносів та геоморфологічним змінам водних тіл, що особливо актуально для таких динамічних річок, як Дунай, але й екологічним показникам. Оцінка якості зависі має враховувати хімічну взаємодію між твердими частинками та водним середовищем з розчинними сполуками – специфічний для полютантів коефіцієнт розподілу опосередковано використовують для оцінки їх концентрації у відповідних фазах та прогнозування перерозподілу під впливом зовнішніх умов в системі «завись – вода».

Впровадження таких комплексних досліджень якісних та кількісних характеристик речовини водних потоків, окрім отримання нових знань щодо природних та техногенних факторів формування стоку річок та створення баз даних для відповідних прогнозів, наблизять Україну до європейської системи спостережень і дозволять в майбутньому посилити міждержавну співпрацю.

Подяки. Це дослідження виконується в рамках бюджетної тематики, а також є частиною проєкту SUstainNable DANube black Sea system SUNDANSE, який співфінансується Європейським Союзом.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карта «Перевищення ГДК показників якості води на постах спостереження». URL: http://monitoring.davr.gov.ua/ (дата звернення: 24.11.2025).
2. Nasiedkin Ye.I.; Olshtynska O.P.; Stadnichenko S.M.; Ivanova G.M.; Yemelianov V.O.; Dovbysh S.M.; Fedoseienkov S.G. Monitoring of suspended matter in the Dnipro River within Zaporizhzhia city, the main trends of 2022. *Мінеральні ресурси України*. 2024. № 3. С. 69–72. URL: https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.69-72 (дата звернення: 24.11.2025).
3. Nasiedkin Ye.I., Havryliuk R.B., Ivanova G.M., Fedoseenkov S.G., Shundel O.I., Goncharov O.Yu. (2025). Sediment traps as a tool for studying river suspended matter in water quality control and sediment management. *18th International Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»,* 1–5.
4. Friedl G., Teodoru C., Wehrli B. Is the Iron Gate I reservoir on the Danube River a sink for dissolved silica? *Biogeochemistry*. 2004. Vol. 68, no. 1. P. 21–32. URL: https://doi.org/10.1023/b:biog.0000025738.67183.c0 (дата звернення: 24.11.2025).
5. Ye. I. Nasedkin, O.P. Olshtynska, V.V. Permyakov, S.M. Dovbysh, G.M. Ivanova, O.A. Mytrofanova, S.G. Fedoseenkov. Features of the formation, intake and distribution of the iron-containing component in the water suspension of the Dnieper river within Zaporizhzhia city . *Geological journal*. 2023. № 4. С. 50–60. URL: https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.277352 (дата звернення: 24.11.2025).
6. Митропольский А.Ю., Безбородов А.А., Овсяный Е.И. Геохимия Черного моря. Киев: Наукова думка, 1982. 144 с.
7. River plastic emissions to the world's oceans / L. C. M. Lebreton та ін. *Nature Communications*. 2017. Т. 8, № 1. URL: https://doi.org/10.1038/ncomms15611 (дата звернення: 24.11.2025).
8. The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river / A. Lechner та ін. *Environmental pollution*. 2014. Т. 188. С. 177–181. URL: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006 (дата звернення: 24.11.2025).
9. Exploring the microplastics distribution in the bottom sediments of the western Black Sea / V. Iemelianov та ін. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*. 2024. № 4 (107). С. 104–113. URL: https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.13 (дата звернення: 24.11.2025).
10. В.О. Ємельянов, Є.І. Насєдкін, Т.С. Куковська, Н.О. Федорончук, С.М. Довбиш. Microplastics in the geological-ecological subsystem of the coastal part of the geoecosystem of the Georgian Shelf. *Мінеральні ресурси України*. 2025. № 2. С. 89–94. URL: https://doi.org/10.31996/mru.2025.2.89-94 (дата звернення: 24.11.2025).

Стаття надійшла до редакції 01.08.2025 і прийнята до друку після рецензування 21.10.2025

REFERENCES

1. Karta «Perevyshchennia HDK pokaznykiv yakosti vody na postakh sposterezhennia». (n.d.). map. Retrieved November 24, 2025, from http://monitoring.davr.gov.ua/
2. Nasiedkin, Y. I., Olshtynska, O. P., Stadnichenko, S. M., Ivanova, G. M., Yemelianov, V. O., Dovbysh, S. M., & Fedoseienkov, S. G. (2024). Monitoring of suspended matter in the Dnipro River within Zaporizhzhia city, the main trends of 2022. *Mineral Resources of Ukraine*, (3), 69–72. https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.69-72
3. Nasiedkin, Ye. I., Havryliuk, R. B., Ivanova, G. M., Fedoseenkov, S. G., Shundel, O. I., & Goncharov, O. Yu. (2025). Sediment traps as a tool for studying river suspended matter in water quality control and sediment management. In *18th International Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»,* 1–5.
4. Friedl, G., Teodoru, C., & Wehrli, B. (2004). Is the Iron Gate I reservoir on the Danube River a sink for dissolved silica? *Biogeochemistry*, *68*(1), 21–32. https://doi.org/10.1023/b:biog.0000025738.67183.c0
5. Nasedkin, Y. I., Olshtynska, O. P., Permyakov, V. V., Dovbysh, S. M., Ivanova, G. M., Mytrofanova, O. A., & Fedoseenkov, S. G. (2023). Features of the formation, intake and distribution of the iron-containing component in the water suspension of the Dnieper river within Zaporizhzhia city. *Geological Journal*, (4), 50–60. https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.277352
6. Mitropol'skyi, A. Yu., Bezborodov, A. A., & Ovsyanyi, E. I. (1982). *Geokhimiia Chernogo moria*. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
7. Lebreton, L. C. M., van der Zwet, J., Damsteeg, J.-W., Slat, B., Andrady, A., & Reisser, J. (2017). River plastic emissions to the world's oceans. *Nature Communications*, *8*(1). https://doi.org/10.1038/ncomms15611
8. Lechner, A., Keckeis, H., Lumesberger-Loisl, F., Zens, B., Krusch, R., Tritthart, M., Glas, M., & Schludermann, E. (2014). The Danube so colourful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. *Environmental Pollution*, *188*, 177–181. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.02.006
9. Iemelianov, V., Nasiedkin, Y., Kukovska, T., Koshliakova, T., Fedoronchuk, N., Shuraiev, I., & Yukhymchuk, V. (2024). Exploring the microplastics distribution in the bottom sediments of the western Black Sea. *Visnyk of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geology*, (4 (107)), 104–113. https://doi.org/10.17721/1728-2713.107.13
10. Iemelianov, V. O., Nasedkin, Ye. I., Kukovska, T. S., Fedoronchuk, N. O., & Dovbysh, S. M. (2025). Microplastics in the geological-ecological subsystem of the coastal part of the geoecosystem of the Georgian Shelf. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 89–94. https://doi.org/10.31996/mru.2025.2.89-94

The article was received 01.08.2025 and was accepted after revision 21.10.2025

Насєдкін Євген Ігорович
кандидат геологічних наук, старший науковий співробітник, Державна наукова установа «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України», Національний екологічний центр України
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2633-9291 ***e-mail:*** nasedevg@ukr.net

Гаврилюк Руслан Борисович
кандидат геологічних наук, вчений секретар (Інститут геологічних наук НАН України), голова (Національний екологічний центр України)
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6465-9440 ***e-mail:*** gavrilyuk.ruslan@gmail.com

Федосеєнков Сергій Геннадійович
кандидат геологічних наук, заступник директора з науково-технічної роботи Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-9576-2977 ***e-mail:*** 22lex22s@ukr.net

Невєрова Світлана Іванівна
науковий співробітник групи геофізичних методів досліджень і збору даних відділу проблем геології моря та осадового рудоутворення Державної наукової установи «Центр проблем морської геології, геоекології та осадового рудоутворення НАН України»
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0002-7472-4776 ***e-mail:*** sidzp2019@gmail.com

Стадніченко Світлана Миколаївна
кандидат геологічних наук, провідний науковий співробітник, Інститут геологічних наук НАН України
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1038-6878 ***e-mail:*** stadnichenkosm@gmail.com

Земський Денис Валерійович
науковий співробітник, Інститут геологічних наук НАН України
Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Олеся Гончара 55б
ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-3041-4034 ***e-mail:*** Denua@yahoo.com

УДК 004.942+519.816

Oleksii Sholokhov[1], associate professor
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8676-3724 ***e-mail:*** gyroalex@ukr.net

Dmytro Diakon[2], postgraduate student
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6826-7455 ***e-mail:*** dmitro.dyakon@gmail.com

[1]Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine
[2]Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

APPLICATION OF THE MARKOV MODEL IN INFORMATION TECHNOLOGY OF THE FORMATION OF THE LOCAL SOCIO-ECONOMIC SYSTEM

Abstract. *The methodology for using Markov models in information technology to support decision-making in the regional and local development management system under conditions of uncertainty is obtained. The organization of cooperation at the local and regional levels is today one of the urgent issues of ensuring national sustainability. After all, in conditions of territorial proximity with the joint use of available resources and infrastructure, forming a single economic environment, the unification of territorial communities (and/or individual cities or villages) into local socio-economic systems allows ensuring effective local development, capacity and sustainability of communities through cooperation, joint use of resources and the resulting synergistic effect from such interaction. Complex dynamic systems are formed, for which it is necessary to ensure the consistency of the interaction of their elements, taking into account competition, increasing load on infrastructure, development of information technologies, changes in the planning of settlements, location of production, etc.*

To solve the above problems, the work proposes to use Markov models, models of mass service systems. Based on the fact that most territorial communities have a formed sectoral structure, social sphere facilities, transport highways, etc., the work considers the problem of optimal management of the existing mass transit system. The advantages of using mass transit system models are that their use allows you to take into account the specifics of inter-sectoral interaction at the local and regional levels, to assess the quality of management, having previously found out whether certain influences are available for the system under study. The developed models, methods, algorithms are intended for use in information technology to support decision-making in the system of state and public administration. Its implementation will increase the quality and efficiency of management decisions by optimizing analytical processes.

Keywords: *information technology, Markov models, decision support system, simulation modeling, socio-economic system.*

© О.В. Шолохов, Д.В. Дякон, 2025

О.В. Шолохов[1], Д.В. Дякон[2]

[1]Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна
[2]Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ МАРКОВСЬКОЇ МОДЕЛІ У ІНФОРМАЦІЙНІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНОЇ СИСТЕМИ

Анотація. *В статті представлена методика використання марковських моделей у інформаційній технології підтримки прийняття рішень у системі управління регіональним та місцевим розвитком в умовах невизначеності. Організація співробітництва на місцевому та регіональному рівнях сьогодні є одним із актуальних питань забезпечення національної стійкості. Адже в умовах територіальної близькості за спільного використання наявних ресурсів та інфраструктури, утворюючи єдине економічне середовище, об'єднання територіальних громад (та/або окремих міст чи сіл) у локальні соціально-економічні системи дозволяє забезпечити ефективний місцевий розвиток, спроможність та стійкість громад за рахунок кооперації, спільного використання ресурсів та отримуваного синергетичного ефекту від такої взаємодії. Формуються складні динамічні системи, для яких необхідно забезпечити узгодженість взаємодії їх елементів, враховуючи конкуренцію, зростання навантаження на інфраструктуру, розвиток інформаційних технологій, зміни у плануванні населених пунктів, розміщенні виробництва тощо.*

Для розв'язання вказаних задач у роботі запропоновано використовувати марковські моделі, моделі систем масового обслуговування. Виходячи з того, що більшість територіальних громад мають сформовану галузеву структуру, об'єкти соціальної сфери, транспортні магістралі тощо, в роботі розглядається задача оптимального керування наявною системою масового обслуговування. Перевагами застосування моделей систем масового обслуговування є те, що їх використання дозволяє врахувати специфіку міжгалузевої взаємодії на локальному та регіональному рівнях, оцінити якість керування, попередньо з'ясувавши, чи доступні певні впливи для досліджуваної системи. Розроблені моделі, методи, алгоритми призначені для використання у інформаційній технології підтримки прийняття рішень у системі державного та публічного управління. Її впровадження підвищить якість та оперативність управлінських рішень за рахунок оптимізації аналітичних процесів.

Ключові слова: *інформаційна технологія, марковські моделі, система підтримки прийняття рішень, імітаційне моделювання, соціально-економічна система.*

https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.4.186-200

Вступ

Задача формування ефективних механізмів сталого розвитку через об'єднання ресурсів, спільні інвестиційні проєкти та модернізацію інфраструктури тощо визначена як одна з пріоритетних задач регіонального розвитку в рамках проєкту Ради Європи «Посилення багаторівневого врядування та місцевої демократії для підтримки відновлення України» [1].

Саме така організація співробітництва на місцевому та регіональному рівнях [2, 3] стає сьогодні одним із головних інструментів забезпечення національної стійкості.

За рахунок забезпечення взаємодії економічних, соціальних, екологічних, управлінських та інфраструктурних компонентів в умовах територіальної близькості, такі системи забезпечують ефективний місцевий розвиток, спроможність та стійкість громад за рахунок кооперації, спільного використання ресурсів та отримуваного синергетичного ефекту від взаємодії. Обґрунтування адміністративно-територіального складу локальних соціально-економічних систем, визначення їх оптимальної галузевої структури, інфраструктурних рішень є складними задачами, що потребують розроблення відповідного математичного апарату, адаптованого до використання у інформаційних технологіях, призначених для систем підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним та місцевим розвитком.

Тому, тема даного дослідження є актуальною, має наукове та практичне значення, обумовлює необхідність проведення подальших досліджень в цьому напрямку.

Метою дослідження є розроблення інформаційної технології підтримки прийняття рішень щодо обґрунтування оптимального складу локальних соціально-економічних систем, основу якої становлять математичні та комп’ютерні моделі.

Особливістю пропонованої інформаційної технології є те, що у процесі побудови моделей, дослідження здійснюється у декілька етапів, поступово змінюючи рівень деталізації, імітуючи поведінку системи, виявляючи нові проблеми розвитку та зовнішні і внутрішні фактори, що спричиняють їх, покращуючи таким чином отримувані результати.

Наукова новизна полягає у поєднанні оптимізаційної багатокритеріальної моделі формування локальної соціально-економічної системи (ЛСЕС) з керованою марковською моделлю, що дозволяє формалізувати процес трансформації галузевої структури до цільової, забезпечивши узгоджене використання потоків ресурсів в умовах невизначеності.

Для досягнення мети вирішено такі завдання:

- проаналізовані сучасні підходи щодо формування локальних соціально-економічних систем, їх особливості та підходи забезпечення їх сталого розвитку;
- побудовано моделі досліджуваних процесів з урахуванням впливу різних груп чинників з метою прогнозування їх розвитку для підтримки прийняття відповідних управлінських рішень;
- на основі системного підходу побудовано та реалізовано інформаційну технологію розв'язання задач моделювання та прогнозування сталого розвитку локальних соціально-економічних систем для її подальшого використання у відповідних системах підтримки прийняття рішень.

Теоретичні основи дослідження

Позитивні зрушення у регіональному розвитку України, відзначені у звіті Європейської Комісії [4], є результатом спільної роботи державної влади та місцевого самоврядування щодо розроблення власних та впровадження кращих світових практик та інструментів забезпечення сталого розвитку. Вже

зроблені активні кроки для забезпечення системності підтримки цифрового розвитку місцевого самоврядування [5], посилення його аналітичного забезпечення. Зокрема, впроваджується методика класифікації територій NUTS – ухвалені перелік та вимоги до показників, за якими українські громади буде віднесено до різних функціональних типів територій [6]. Змінюються підходи до планування та стратегування розвитку регіонів, громад та територій. Вже з листопада 2025 року в Україні розпочато проєкт міжнародної технічної допомоги «Управління місцевими фінансами для відновлення та відбудови громад» [7], метою якого є допомогти громадам перейти від управління доходами до планування видатків. Реалізація цього підходу передбачає формування системи управління розвитком громад та територій, спрямованої на забезпечення власної, внутрішньої спроможності, підвищення ефективності використання наявних ресурсів, залучення інвестицій та створення умов для їх підтримання, збалансованого економічного розвитку територій. Тобто, має застосовуватись комплексний (інтегрований) підхід до управління місцевим та регіональним розвитком, який в сучасних умовах більше відповідає концепції сталого розвитку, ніж галузевий, адже його застосування дозволяє узгодити цілі регіональної політики, місцевого самоврядування, пріоритети населення та бізнесу відповідно до спільного бачення майбутнього певних територій. Концепція комплексного (інтегрованого) розвитку [8] означає, що кожний рівень соціально-економічної системи країни, кожна галузь зберігають свої акценти і спільно досягають синергетичного ефекту від взаємодії та територіальної близькості. Тобто, формуються складні динамічні системи – об’єднання розташованих просторово близько територіальних громад, населених пунктів, районів тощо, для спільного використання потоків виробничих ресурсів, інформаційного простору, економічного середовища тощо. Тому, необхідно забезпечити узгодженість спільного використання ресурсів, враховуючи конкуренцію, зростання навантаження на інфраструктуру, розвиток інформаційних технологій, зміни у плануванні населених пунктів, розміщенні виробництва тощо. Для розв’язання вказаних задач пропонується використовувати моделі систем масового обслуговування. Ці моделі, як зазначають фахівці [9-12], є перспективним напрямом досліджень у галузі регіонального управління, оскільки їх використання забезпечує обґрунтування утворення та розвитку соціально-економічних систем різних типів в умовах невизначеності, спричиненої військовою агресією, та структурно-динамічних змін внаслідок інтеграції до європейського простору.

Результати дослідження

Зокрема, задачі формування галузевої та територіальної структури ЛСЕС, узгодження обміну ресурсами, використання інфраструктури тощо можна представити у вигляді марківських моделей систем масового обслуговування (СМО) (марківського процесу) з дискретним часом: $n = 0, 1, \ldots$. [13].

Зауважимо, що для оптимізації процесу обслуговування така СМО має бути керованою. Специфікуємо це поняття. Отже, СМО, як об’єкт дослідження в цілому і окремих її частин, що визначають певний марковський процес, містить наступні складові: вхідний потік вимог; власне структуру СМО;

алгоритм обслуговування вимог з певними витратами часу на обслуговування включно з часом перебування вимоги у системі; дисципліну обслуговування. Кожна складова залежить від одного або більше параметрів. Якщо хоча б один параметр навіть однієї складової піддається бажаній зміні, таку систему і будемо надалі звати керованою [14]. Критеріїв якості керування може бути багато, але ж не всі з них розв'язувані навіть чисельно. Також треба з'ясувати, чи доступні нам певні впливи, а потім формулювати критерій. Слід відмітити, що задачі керування та синтезу СМО різні і, з огляду на те, що більшість фізичних об'єктів перебудовувати вкрай небажано, то актуальною є задача власне оптимального керування наявною СМО, що відбиває певний фізичний об'єкт. Тому, саме такий підхід було реалізовано у розроблюваній інформаційній технології.

Схема застосування пропонованої інформаційної технології представлена на рис. 1.

Рис. 1. Інформаційна технологія обґрунтування рішень щодо формування локальних соціально-економічних систем

Локальну соціально-економічну систему розглядатимемо з точки зору системи масового обслуговування, коли між елементами системи здійснюється обмін ресурсами: виробничими, трудовими, інвестиційними, спільно використовується соціальна та транспортна інфраструктури.

Розглянемо керовану одноканальну СМО з пуассоновим вхідним потоком з $\lambda > 0$ і сталим часом обслуговування $c > 0$. Довжина черги k обмежена $K > 0$. Керуванням вважається прийняття-неприйняття на обслуговування

чергової вимоги у момент її постановки у чергу. Неприйнята вимога втрачається, прийнята вимога стає в чергу і починає обслуговуватись щойно звільняється прилад, що обслуговує. Прийнята на обслуговування вимога дає дохід $d > 0$ і спричиняє збитки, пропорційні часу $T = k\Delta t$ перебування її у черзі, що виражаються добутком коефіцієнта втрат $r > 0$ на час перебування її у черзі – $T \cdot r$. Зрозуміло, що будь-яка вимога, яка очікує в черзі, має тим меншу прибутковість, чим далі вона від входу. Вираз $K < truncate\left(\frac{d}{r \cdot c}\right)$ дає необхідне обмеження на довжину черги, що забезпечує дохідність останньої у черзі вимоги. Сукупний дохід розглянутої СМО від обслуговування накопиченої черги складатиме $d(k) = k \cdot d - \frac{c \cdot r(1+k)k}{2}$, $k < K$. Максимальний дохід від черги при $k = K$ у разі натурального $d/(r \cdot c)$ складатиме $d(K) = \frac{d(d - r \cdot c)}{2 \cdot r \cdot c}$.

У випадку детермінованого надходження вимог чергу не утворюють або утворюють не більше, ніж $k = 1$. У разі, якщо вимоги надходять у нашу СМО частіше, ніж одна вимога за час обслуговування c, то їм відмовлятимуть. Одну вимогу ставлять у чергу на обслуговування з настанням умови $c - t \le \Delta t_{input}$ – коли час, що залишився на обслуговування вимоги, яка як раз обслуговується, стає менше інтервалу часу Δt_{input}, з яким у СМО приходить нова вимога. Оскільки вимоги у СМО надходять з випадковим інтервалом часу за розподілом Пуассона з інтенсивністю $\lambda > 0$, то статична стратегія повної відмови від черги може спричинити простій СМО без роботи, який зменшить дохід від експлуатації СМО порівняно з більшим завантаженням СМО за рахунок утворення черги, хоча і з відповідною сплатою штрафу. Необхідно знайти *стратегію* R прийняття вимог на обслуговування, яка максимізує очікуваний середній дохід за одиницю часу за умови нескінченної тривалості функціонування СМО. Стратегія утворюється на підставі закону надходження вимог і вимірюваних інтервалів часу між вимогами.

Покладемо, що рішення приймаються відразу у момент надходження вимоги у СМО. Стан СМО фіксується у момент надходження до неї n-ї вимоги (тобто, в момент часу n). Станом СМО назвемо пару (k, t), де k – число вимог, що знаходяться у СМО, t – час, що пройшов з початку обслуговування вимоги, яка займає прилад у даний час.

Позначимо a_0 – рішення не приймати вимогу, що щойно надійшла, на обслуговування, a_1 – брати. Тоді СМО є керованим марковським процесом з дискретним часом. А досліджувану локальну соціально-економічну систему розглядатимемо як систему масового обслуговування.

Нехай, X і A у загальному випадку є деякими повними сепарабельними метричними просторами, що складаються з елементів x і a, відповідно. У дискретному випадку X і A є зліченними множинами фазового простору

станів СМО і керування СМО, що складаються з елементів x_n і a_n, $n = 0, 1, 2, \ldots$ відповідно. **B** і **A** – σ -алгебри борелевських підмножин X і A відповідно.

F – відображення, що зіставляє кожному $x \in X$ деяку непусту замкнену множину $A_x \subseteq A$ так, що множина $\Delta = \{(x, a) : x \in X, a \in A_x\}$ вимірна за Борелем у добутку $X \times A$.

Розглянемо дискретну керовану СМО. Слід зазначити, що необхідною умовою придатності моделі дискретній СМО для практичного застосування є скінченність множин X і A, хоча елементи цих множин та їх кількість потребують визначення. Надалі називатимемо такі СМО «практичним випадком».

Нехай у момент часу n СМО знаходиться у стані $x_n \in X$ і у момент настання цього стану обирається керування $a_n \in A$. Основне припущення стосовно ймовірнісної еволюції керованої дискретної СМО полягатиме у наступному:

$$P\{x_{n+1} \in B \mid x_0, a_0, x_1, a_1, \ldots, x_n = x, a_n = a\} = P(B \mid x, a), \quad (1)$$

де $B \in \mathbf{B}$ – довільна борелева множина, $P(B \mid x, a)$ – при фіксованих x, a ($(x, a) \in \Delta$) ймовірнісна міра $(X, \mathbf{B})$, а при фіксованій **B** – вимірна за Борелем функція на Δ.

Допустимою стратегією R для керованої дискретної СМО є послідовність $(\pi_0, \pi_1, \ldots, \pi_n, \ldots)$, де $\pi_n(\square \mid x_0, a_0, \ldots, a_n, x_n)$ – ймовірнісна міра на $(A, \mathbf{A})$ зосереджена на A_{x_n} і вимірним чином залежна від $h_n = (x_0, a_0, \ldots, a_n, x_n)$ – історії керованої системи до моменту n, $h_n \in \underbrace{\Delta \times \Delta \times \ldots \times \Delta}_{n} \times X$. $\pi_n(\square \mid x_0, a_0, \ldots, a_n, x_n)$ задає рандомізоване правило вибору керування $a_n \in A$ на підставі h_n. Стратегія R буде марковською, якщо $\pi_n(\square \mid x_0, a_0, \ldots, a_n, x_n) = \pi_n(\square \mid x_n)$, $n = 0, 1, 2, \ldots$ Марківська стратегія R є стаціонарною, якщо $\pi_n(\square \mid x_n) = \pi(\square \mid x_n)$, $n = 0, 1, 2, \ldots$ Марківська стратегія R є стаціонарною нерандомізованою, якщо міра $\pi_n(\square \mid x)$ вироджена для будь-якого $x \in X$.

Стаціонарна нерандомізована стратегія R ототожнюється з борелевською функцією $R(x)$, що задає $X \to A$ так, що для будь-якого $\forall x \in X : R(x) \in A_x$.

Позначимо $\Re$ – клас усіх допустимих стратегій, $\Re_0$ – клас стаціонарних нерандомізованих (детермінованих) стратегій.

В загальному випадку неможливо стверджувати існування хоча б однієї допустимої стратегії.

Умови існування стратегії, що належить $\Re_0$, менш суворі. Отже, щоб клас $\Re_0$ був не порожнім, необхідно існування вимірності відображення $F: x \to A_x$, $x \in X$, такого, що $\forall x \in X\ \exists F(x) \subseteq A, F(x) \neq \varnothing$ і $\{x : F(x) \cap E \neq \varnothing\} \in \mathbf{B}$, де E – відповідно відкрита, замкнена або борелева множина в A.

В подальшому припускаємо, що відображення $F: x \to A_x$, $x \in X$ є вимірним. У випадку $A_x \equiv A$ відображення F є вимірним і клас $\Re_0$ співпадає з множиною всіх борелевських функцій, які відображають X в A.

Визначення стратегії R означає визначення випадкового процесу, який, взагалі кажучи, не є марковським, не дивлячись на представлення (1), оскільки вибір рішення у будь-який момент часу $x \in X$ може залежати від усієї історії h_n. Назвемо такий процес керованим стратегією R випадковим процесом. Якщо стратегія марковська (стаціонарна), то керований процес є марковським (однорідним марковським).

Якщо ввести поняття доходу d, пов'язаного з керованим процесом, то можна сформулювати критерій оптимальності стратегії керування. Наприклад, якщо у стані $x \in X$ прийнято керування $a \in A_x$, то очікуваний дохід за один крок дорівнюватиме $r(x,a)$. Вважатимемо, що функція $r(x,a)$ вимірювана за Борелем і обмежена на Δ:

$$\left|r(x,a)\right| < L < \infty, (x,a) \in \Delta. \tag{2}$$

Надалі набір $\{X, A, \{A_x\}, P, r\}$ визначатиме керовану марковську модель з дискретним часом.

Розглянемо два наступні критерії якості керування:

1. $\psi_\beta(x, R) = M_x^R \sum_{n=0}^{\infty} \beta^n r(x_n, a_n)$, $0 < \beta < 1$,

2. $\varphi(x, R) = \liminf_{n \to \infty} \frac{1}{n+1} M_x^R \sum_{k=0}^{n} r(x_k, a_k)$.

M_x^R – умовне математичне сподівання, яке відповідає процесу, керованому стратегією R за умови $x_0 = x$.

Стратегія R^* оптимальна відносно критерію 1, якщо $\psi_\beta(x, R^*) = \sup_{R \in \Re_0} \psi_\beta(x, R)$, $x \in X$.

Надалі критерій 1 зватимемо ψ-критерієм, а оптимальну стратегію для нього – ψ-оптимальною стратегією R^*_ψ.

Стратегія R^* оптимальна відносно критерію 2, якщо $\varphi(x, R^*) = \sup_{R \in \Re_0} \varphi(x, R)$, $x \in X$.

Надалі критерій 2 зватимемо φ-критерієм, а оптимальну стратегію для нього – φ-оптимальною стратегією R^*_φ.

Достатні умови існування стаціонарних нерандомізованих φ-оптимальних стратегій R^*_φ даються теоремою [15].

Нехай існують постійна g і обмежена борелева функція $v(x)$ на X такі, що

$$g + v(x) = \sup_{a \in A_x} \left\{ r(x, a) + \int_X v(y) P(dy \mid x, a) \right\}, x \in X. \quad (3)$$

Тоді

$$\sup_{R \in \Re_0} \varphi(x, R) \le g, x \in X. \quad (4)$$

Якщо при цьому

$$g + v(x) = \max_{a \in A_x} \left\{ r(x, a) + \int_X v(y) P(dy \mid x, a) \right\}, x \in X, \quad (5)$$

і для деякої стратегії $R^* \in \Re_0$

$$g + v(x) = r\left(x, R^*(x)\right) + \int_X v(y) P(dy \mid x, R^*(x)), x \in X, \quad (6)$$

тоді стратегія R^* – φ-оптимальна і

$$\varphi(x, R^*) \equiv g. \quad (7)$$

Для визначення конструктивного методу пошуку φ-оптимальної стратегії в класі $\Re_0$ необхідно ввести наступні припущення:

Припущення 1. Існує невід'ємна міра μ на $(X, \mathbf{B})$, така, що:

1) $\mu(B) \le P(B \mid x, a), (x, a) \in \Delta, B \in \mathbf{B}$,

2) $\mu(X) > 0$,

яке виконається, зокрема, якщо існує такий стан $x^* \in X$, що має місце

$$P\left(\{x^*\} \mid x, a\right) =\ge \alpha > 0, (x, a) \in \Delta.$$

Тобто, у якості μ можна взяти міру, зосереджену у $\{x^*\}$ з масою α.

Припущення 2. Існує послідовність $\{\beta_x\} \uparrow 1$, деяка фіксована точка $z \in X$ і число $N < \infty$ такі, що функція $\left|\nu_{\beta_n}(x)\right| = \left|\psi_{\beta_n}(x) - \psi_{\beta_n}(z)\right| < N, n = 1, 2, \ldots$

Достатні умови існування в класі $\Re_0$ φ-оптимальної стратегії можна отримати з ψ-критерію у випадку $A_x \equiv A$, де A – скінченна або компактна множина.

Нехай A – скінчена множина і виконується *Припущення 1*. Тоді для будь якого $0 < \beta < 1$ в класі $\Re_0$ існує φ-оптимальна стратегія R_β і максимальний дохід $\psi_\beta(x, R_\beta)$ буде єдиним розв'язком рівняння [16]

$$\psi_\beta(x) \max_{a \in A} \left\{ r(x, a) + \beta \int_X \psi_\beta(y) P(dy \mid x, a) \right\} \qquad (8)$$

Нехай A – компактна множина, функція $r(x, a)$ напівнеперевна зверху на $X \times A$ і перехідна ймовірність $P(\cdot \mid x, a)$ слабко неперервна по x, a і виконується *Припущення 1*. Тоді для будь-якого $0 < \beta < 1$ в класі $\Re_0$ існує ψ-оптимальна стратегія R_β і максимальний дохід $\psi_\beta(x, R_\beta)$ буде єдиним розв'язком рівняння (8) [17].

Нехай X – компакт, A – скінченна множина, виконується *Припущення 2*, функція $r(x, a)$ неперервна по $x, \forall a \in A$, $\theta(X \mid x, x', a) \underset{x \to x'}{\to} 0, \forall a \in A$, де $\theta(\cdot \mid x, x', a)$ – повна варіація міри $Q(\cdot \mid x, x', a) = P(\cdot \mid x, a) - (\cdot \mid x', a)$. Тоді в класі $\Re_0$ існує φ-оптимальна стратегія.

Для скінченного фазового простору станів існує наступний результат [14].

Нехай A – зліченна множина, X – компактна множина, виконується *Припущення 2*, функція $r(x, a)$ неперервна по $a, \forall x \in X$, $\sum_{y \in X} \left| P\left(\{y\} \mid x, a\right) - P\left(\{y\} \mid x, a'\right) \right| \to 0, a' \to a, x \in X$. Тоді в класі $\Re_0$ існує φ-оптимальна стратегія.

Деякі послаблення достатніх умов існування оптимальних стаціонарних стратегій для керованих марковських процесів можна знайти в [18].

У даній роботі розглядається керована одноканальна система масового обслуговування (СМО) з пуассоновим вхідним потоком з λ > 0 і сталим часом обслуговування t_srv > 0. Довжина черги обмежена l_q > 0. Керуванням вважається прийняття-неприйняття на обслуговування чергової вимоги у момент її постановки у чергу. Неприйнята вимога втрачається, прийнята

вимога стає в чергу і починає обслуговуватись, щойно звільняється прилад, що обслуговує. Прийнята на обслуговування вимога дає дохід inc > 0 і несе збитки, пропорційні часу перебування вимоги у черзі, що виражаються коефіцієнтом w_q > 0. Необхідно знайти стратегію прийняття вимог на обслуговування, яка максимізує очікуваний середній дохід за одиницю часу за умови нескінченної тривалості функціонування СМО.

$$X = \{(0,0)\} \cup \{1, 2, \ldots, K\} \times [0, c); \quad (9)$$

$$A = \{a_0, a_1\}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A(k,t) &= A, if\ (k,t) \in X, k \le K \\ A(k,t) &= \{a_0\}, if\ k \ge K+1 \end{aligned}; \quad (11)$$

$$P(\{k\} \times [t, \tau) \mid (k,t), a_0) = 1 - e^{-\lambda(\tau - t)}, (k,t) \in X, k > 0, t < \tau \le c; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} &P(\{k-i\} \times [p, \tau) \mid (k,t), a_0) = e^{-\lambda(ic-t)}\left[1 - e^{-\lambda\tau)}\right], \\ &(k,t) \in X, k > 0, i = 1, 2, \ldots, k-1, t < \tau \le c \end{aligned}; \quad (13)$$

$$P(\{0,0\} \mid (k,t), a_0) = e^{-\lambda(kc-t)}, (k,t) \in X; \quad (14)$$

$$P(B \mid (k,t), a_1) = P(B \mid (k+1,t), a_0), (k,t) \in X, k \le K; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} r((k,t), a_0) &= 0, if\ i = 0, (k,t) \in X \\ r((k,t), a_0) &= d - r(kc - t), if\ i = 1, (k,t) \in X, k \le K \end{aligned} \quad (16)$$

З формул (14), (15) випливає, що $P(\{0,0\} \mid (k,t), a) \ge e^{-\lambda(K+1)c} = a > 0$, $(k,t) \in X, a \in A_{(k,t)}$ і ймовірність переходу задовольняє припущенню існування невід'ємної міри μ з масою a на $(X, \mathbf{B})$ такій, що $\mu(X) > 0$ і $\mu(B) \le P(B \mid x, a)$, $(x, a) \in \Delta$, $B \in \mathbf{B}$. Тоді існує φ-оптимальна стратегія $R_\varphi^* \in \Re_0$. Рівняння φ-оптимальності можна розв'язати методом послідовних наближень.

Для побудови моделі скористаємось [19, 20]. Графічно імітаційна модель СМО представлена на рис. 2.

Оскільки існування і єдиність розв'язку рівняння (8) доведено, то його пошук можна здійснити за допомогою ітераційного методу Ховарда [21], реалізувавши його сучасними програмними методами [22], а саме, в заданому діапазоні шукаємо обмеження на чергу на кожному кроці моделювання, яке, відповідно, дає максимум на нескінченному проміжку часу і на кожному кроці передається у модель (рис. 3).

Оскільки нескінченне моделювання неможливо, крім того, практичний випадок також обмежений у часі, то приймаємо моделювання у тривалому, але обмеженому часі як нескінченне. Бачимо, що у випадку застосування оптимальної стратегії у абсолютної кількості було обслуговано майже та ж кількість вимог, що і для неоптимальної стратегії. Але для збільшення прибутковості, СМО має зменшувати довжину черги.

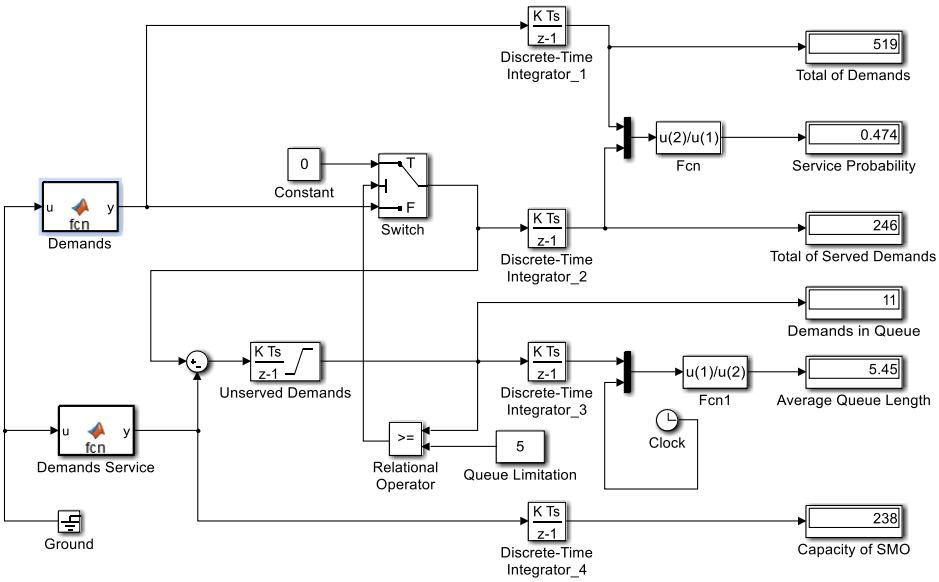


Рис. 2. S-модель СМО з дискретним кроком без оптимальної стратегії

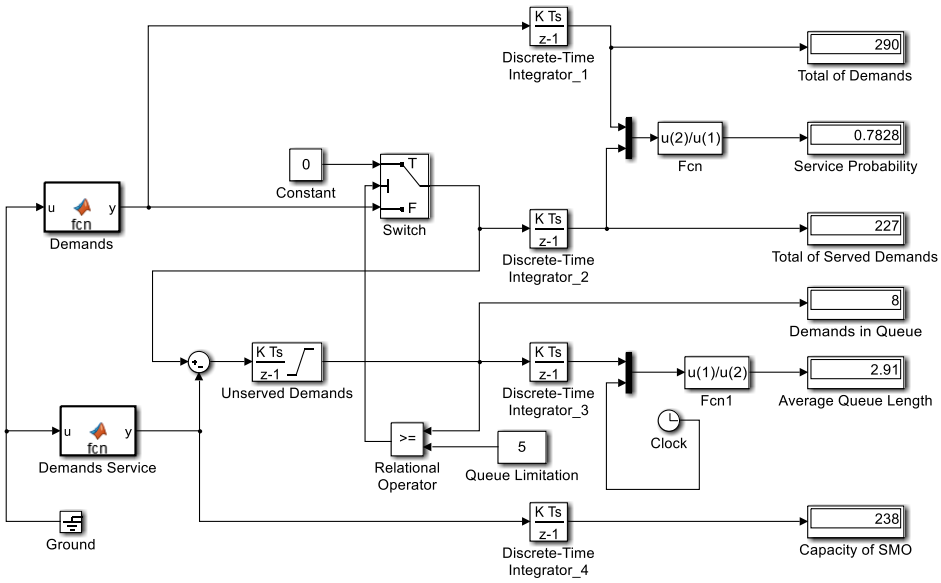


Рис. 3. S-модель СМО з дискретним кроком з оптимальною стратегією

Висновки та перспективи подальших досліджень

В результаті дослідження розроблено інформаційну технологію, основу якої становлять математичні та комп’ютерні моделі, призначені для використання у системах підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним (або місцевим) розвитком. Використання запропонованої інформаційної технології у складі відповідних систем підтримки прийняття рішень для планування та

прогнозування регіонального та місцевого розвитку дозволить активніше та раціональніше використовувати наявний місцевий виробничий та ресурсний потенціал за рахунок кооперації та інтеграції виробництва, спільного використання соціальної, транспортної, інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури. Використання розробленої інформаційної технології дозволить оптимізувати, наприклад, спільне використання складських приміщень, пунктів зберігання та сушіння зерна, медичних закладів тощо. Досягнення переваг забезпечуватиметься за рахунок оброблення заявок у практично замкненому господарському (або соціальному) комплексі локальної соціально-економічної системи, як-то збір урожаю, логістика перевезень різними видами транспорту, обмін виробничими ресурсами у процесі виготовлення продукції. В даній роботі розглянуто оброблення заявок за умови їх надходження за пуассонівським розподілом і те, що процес марковський. В подальших дослідженнях перспективним напрямом є ускладнення моделі, а саме – її багатоканальності та деяких відступах від марковості процесу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Проєкт Ради Європи «Посилення багаторівневого врядування та місцевої демократії для підтримки відновлення України». https://rm.coe.int/ukr-3926-project-leaflet/1680b6650d
2. План дій Ради Європи для України на 2023-2026 роки «Стійкість, відновлення та відбудова». https://rm.coe.int/action-plan-ukraine-2023-2026-ukr/1680aa8282
3. *Громади під тиском війни: співпраця, міжнародна підтримка та фінансова стійкість. Дані моніторингу від Мінрозвитку*. Децентралізація. https://decentralization.ua/news/20100
4. Commission staff working document. Ukraine 2025 Report. https://eu-ua.kmu.gov.ua/wp-content/uploads/EU-enlargement-.pdf
5. *Добре багаторівневе врядування, регіональна політика, реформа PIM та розвиток екосистеми DREAM*. Міністерство розвитку громад та територій України. https://mindev.gov.ua/news/dobre-bahatorivneve-vriaduvannia-rehionalna-polityka-reforma-pim-ta-rozvytok-ekosystemy-dream
6. Про затвердження Статистичної класифікації територіальних одиниць України (NUTS-UA). Наказ Державної служби статистики України № 216 (2025). Україна. https://stat.gov.ua/uk/page-contents/nakaz-vid-01122025-no-216
7. *Проєкт міжнародної технічної допомоги «Управління місцевими фінансами для відновлення та відбудови громад» (Fiscal Governance for Local Reconstruction and Recovery)*. Децентралізація. https://decentralization.gov.ua/news/20167
8. Порядок формування Концепції інтегрованого розвитку території територіальної громади. Наказ Міністерства розвитку громад та територій України № 172. (2022). Україна. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1421-22#Text
9. Артеменко, А. (2025). Моделювання стану кластерних структур за допомогою моделей системи масового обслуговування. *Економіка та суспільство*, 73. https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-73-46
10. Некрасова, Л.А. (2019). *Теоретико-методологічні засади стратегування розвитку виробничих підприємств в умовах децентралізації*. Schweinfurt: Time Realities Scientific Group UG (haftungsbeschränkt). https://economics.net.ua/files/scientific-base/monogr/Nekrasova.pdf
11. Гольдінер, Д. І. (2024). *Метод та моделі оптимізації систем масового обслуговування з використанням технології пріоритезації вхідного потоку заявок* : *дис. ... д-ра філософії*. Харків: Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. https://openarchive.nure.ua/entities/publication/fb847475-7736-42a8-a0c9-d12d0cfaeab4

12. Mass transit systems https://www.studysmarter.co.uk/explanations/architecture/urban-studies-in-architecture/mass-transit-systems/
13. Жерновий, Ю. В. (2004). *Марковські моделі масового обслуговування: тексти лекцій*. Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка.
14. Андрєєв, М. В. (2015). *Оптимізація стохастичних процесів: керовані марковські та напівмарковські моделі: навчальний посібник*. Київ: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ».
15. Taylor, H. M. (1966). Marcovian sequential replacement processes. *The Annals of Mathematical Statistics,* 36 (6), 1677-1694. https://www.jstor.org/stable/2239109
16. Blackwell, D. (1965). Discounted Dynamic Programming. *The Annals of Mathematical Statistics,* 36 (1), 226-235. https://www.jstor.org/stable/2238089
17. Maitra, A. (1968). Discounted Dynamic Programming on Compact Metric spaces. *Sankhyā. the Indian Journal of Statistics, Series A.* 30 (2), 211-216. https://www.jstor.org/stable/25049530
18. Feinberg, T. A., Kasyanov, P. O. & Zadoianchuk, N. V. (2012). Average Cost Markov Decision Processes with Weakly Continuous Transition Probabilities. *Journal Mathematics of Operation Research,* 37 (4), 591-607. https://doi.org/10.48550/arXiv.1202.4122
19. Narayan, U. Bhat. (2015). *An Introduction to Queueing Theory. Modeling and Analysis in Applications.* Springer Science+Business Media New York 2015. https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8421-1
20. MathWorks. Simulink. https://mathworks.com/simulink/
21. Ronald A. Howard. (1960). *Dynamic Programming and Markov Processes*. New York : London: The Technology Press of The Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc. https://gwern.net/doc/statistics/decision/1960-howard-dynamicprogrammingmarkovprocesses.pdf
22. LINE Solver. Queueing Theory Algorithmshttp://line-solver.sourceforge.net/

Стаття надійшла до редакції 16.07.2025 і прийнята до друку після рецензування 28.10.2025

REFERENCES

1. Projekt Rady Jevropy «Posylennja bagatorivnevogo vrjaduvannja ta miscevoi' demokratii' dlja pidtrymky vidnovlennja Ukrai'ny». https://rm.coe.int/ukr-3926-project-leaflet/1680b6650d (in Ukrainian).
2. Plan dij Rady Jevropy dlja Ukrai'ny na 2023-2026 roky «Stijkist', vidnovlennja ta vidbudova». https://rm.coe.int/action-plan-ukraine-2023-2026-ukr/1680aa8282 (in Ukrainian).
3. *Gromady pid tyskom vijny: spivpracja, mizhnarodna pidtrymka ta finansova stijkist'. Dani monitoryngu vid Minrozvytku.* Decentralizacija. https://decentralization.ua/news/20100. (in Ukrainian).
4. Commission staff working document. Ukraine 2025 Report. https://eu-ua.kmu.gov.ua/wp-content/uploads/EU-enlargement-.pdf
5. *Dobre bagatorivneve vrjaduvannja, regional'na polityka, reforma PIM ta rozvytok ekosystemy DREAM.* Ministerstvo rozvytku gromad ta terytorij Ukrai'ny. https://mindev.gov.ua/news/dobre-bahatorivneve-vriaduvannia-rehionalna-polityka-reforma-pim-ta-rozvytok-ekosystemy-dream. (in Ukrainian).
6. Pro zatverdzhennja Statystychnoi' klasyfikacii' terytorial'nyh odynyc' Ukrai'ny (NUTS-UA). Nakaz Derzhavnoi' sluzhby statystyky Ukrai'ny № 216 (2025). Ukrai'na. https://stat.gov.ua/uk/page-contents/nakaz-vid-01122025-no-216. (in Ukrainian).
7. *Projekt mizhnarodnoi' tehnichnoi' dopomogy «Upravlinnja miscevymy finansamy dlja vidnovlennja ta vidbudovy gromad» (Fiscal Governance for Local Reconstruction and Recovery).* Decentralizacija. https://decentralization.gov.ua/news/20167. (in Ukrainian).
8. Porjadok formuvannja Koncepcii' integrovanogo rozvytku terytorii' terytorial'noi' gromady. Nakaz Ministerstva rozvytku gromad ta terytorij Ukrai'ny № 172. (2022). Ukrai'na. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1421-22#Text. (in Ukrainian).

9. Artemenko, A. (2025). Modeljuvannja stanu klasternyh struktur za dopomogoju modelej systemy masovogo obslugovuvannja. *Ekonomika ta suspil'stvo, 73.* https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-73-46. (in Ukrainian).
10. Nekrasova, L.A. (2019). *Teoretyko-metodologichni zasady strateguvannja rozvytku vyrobnychyh pidpryjemstv v umovah decentralizacii'.* Schweinfurt: Time Realities Scientific Group UG (haftungsbeschränkt). https://economics.net.ua/files/scientific-base/monogr/Nekrasova.pdf. (in Ukrainian).
11. Gol'diner, D. I. *(2024). Metod ta modeli optymizacii' system masovogo obslugovuvannja z vykorystannjam tehnologii' priorytezacii' vhidnogo potoku zajavok : dys. ... d-ra filosofii'.* Harkiv: Harkiv. nac. un-t radioelektroniky. https://openarchive.nure.ua/entities/publication/fb847475-7736-42a8-a0c9-d12d0cfaeab4. (in Ukrainian).
12. Mass transit systems https://www.studysmarter.co.uk/explanations/architecture/urban-studies-in-architecture/mass-transit-systems/
13. Zhernovyj, Ju. V. (2004). *Markovs'ki modeli masovogo obslugovuvannja: teksty lekcij.* L'viv: Vydavnychyj centr LNU imeni Ivana Franka. (in Ukrainian).
14. Andrjejev, M. V. (2015). *Optymizacija stohastychnyh procesiv: kerovani markovs'ki ta napivmarkovs'ki modeli: navchal'nyj posibnyk.* Kyi'v: NNK «IPSA» NTUU «KPI». (in Ukrainian).
15. Taylor, H. M. (1966). Marcovian sequential replacement processes. *The Annals of Mathematical Statistics,* 36 (6), 1677-1694. https://www.jstor.org/stable/2239109
16. Blackwell, D. (1965). Discounted Dynamic Programming. *The Annals of Mathematical Statistics,* 36 (1), 226-235. https://www.jstor.org/stable/2238089
17. Maitra, A. (1968). Discounted Dynamic Programming on Compact Metric spaces. *Sankhyā. the Indian Journal of Statistics, Series A.* 30 (2), 211-216. https://www.jstor.org/stable/25049530
18. Feinberg, T. A., Kasyanov, P. O. & Zadoianchuk, N. V. (2012). Average Cost Markov Decision Processes with Weakly Continuous Transition Probabilities. *Journal Mathematics of Operation Research,* 37 (4), 591-607. https://doi.org/10.48550/arXiv.1202.4122
19. Narayan, U. Bhat. (2015). *An Introduction to Queueing Theory. Modeling and Analysis in Applications.* Springer Science+Business Media New York 2015. https://doi.org/10.1007/978-0-8176-8421-1
20. MathWorks. Simulink. https://mathworks.com/simulink/
21. Ronald A. Howard. (1960). *Dynamic Programming and Markov Processes*. New York : London: The Technology Press of The Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc. https://gwern.net/doc/statistics/decision/1960-howard-dynamicprogrammingmarkovprocesses.pdf
22. LINE Solver. Queueing Theory Algorithmshttp://line-solver.sourceforge.net/

The article was received 16.07.2025 and was accepted after revision 28.10.2025

Шолохов Олексій Вікторович
кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри прикладних інформаційних технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Адреса робоча: вул. Богдана Гаврилишина, 24, 04116, м. Київ, Україна
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8676-3724 ***e-mail:*** gyroalex@ukr.net

Дякон Дмитро Валерійович
аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, 0186, м. Київ, Україна
ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6826-7455 ***e-mail:*** dmitro.dyakon@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copyring © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п’яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, Cyr, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім’я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті http://www.es-journal.in.ua, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України http://itgip.org/ у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури http://library.knuba.edu.ua/node/883.

Редактор – **В.П. Берчун**

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.
Тел.: (044) 360-22-66
www.yuston.com.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції серія дк № 497 від 09.09.2015 р.

Підписано і здано до друку 22.12.25 Формат 70х108/16. Папір офсетний. Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 17.68
Обл.-вид. арк. 13.86 Тираж 300 примірників
Замовлення № ___

КИЇВ 2025