

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 54

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 2 (54), квітень – червень 2025 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 2 (54), April – June 2025

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2025

KYIV 2025

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:

О.М. ТРОФИМЧУК, д-р техн. наук,
проф., чл.-кор. НАНУ

О.С. ВОЛОШКІНА, д-р техн. наук, проф.

Н. КАСАГЛІ, професор, Італія

Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ, PhD, Австралія

Ю.І. КАЛЮХ, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В.О. ВАСЯНИН, 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, д-р техн. наук, професор,
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 ЛІУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 8 від 16.06.2025)

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

Кравченко М.В., Ткаченко Т.М., Волошкіна О.С., Василенко Л.О., Святогород І.О.	
Оцінка економічних і екологічних переваг блакитно-зеленої інфраструктури для підвищення стійкості міст до змін клімату.....	7
Sun Xiaodong, Ishchenko V.	
Optimisation of the collection system for waste batteries.....	23
Сатін І.В., Колтик О.Т., Панченко О.С.	
Оцінка обсягів утворення відходів від руйнувань	34
Залож В.І.	
Інноваційні підходи до автоматизації процесів знезараження і очищення водного баласту суден.....	51

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Holinko V., Kuznetsov O., Holinko O.	
Improvement of explosion hazard monitoring systems for technogenic facilities.....	62
Цюрюпа Ю.В., Сахновська В.М.	
Синдром хворої будівлі: невизначеність чинників і виклики класифікації.....	74

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Рогожин О.Г., Трофимчук В.О., Хлобистов Є.В.	
Можливі моделі регіональної еколого-економічної оцінки впливу інженерно-геологічних загроз на стійкість будівель і споруд.....	84
Бушуєва Н.С., Лобок Є.А., Мурованський Г.А.	
Управління інноваційними проектами та продуктами в умовах дигіталізації та турбулентного оточення.....	101
Машков О.А., Присяжний В.І.	
Дешифрування супутникових знімків водозахисних природоохоронних зон з використанням системи штучного інтелекту.....	110

Трофимчук О.М., Коваль Р.Г., Зарудний О.Б.	
Методика прогнозування кількості інвалідів з числа санітарних втрат	121
Василенко В.М., Охарєв В.О., Триснюк Т.В., Ющенко К.С.	
Цифровізація процесів роботи з персоналом для повоєнного відновлення України.....	136
Худинцев М.М., Хоменко О.А.	
Автоматизація стандартизованих процесів кіберстрахування.....	143
Марущак В.М.	
Математична модель дешифрування аерофотознімків та автоматизація аналізу міської інфраструктури.....	154
Просянкіна-Жарова Т.І.	
Інформаційні технології для систем підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком.....	164
Берчун Я.О., Теличко Р.І., Клименков О.А.	
Оцінка зміни технічного стану понівечених багатоповерхових будівель за допомогою штучного інтелекту.....	185
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	199

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Kravchenko M., Tkachenko T., Voloshkina O., Vasylenko L., Sviatohorov I. Assessing the economic and environmental benefits of blue-green infrastructure to increase urban resilience to climate change.....	7
Sun Xiaodong, Ishchenko V. Optimisation of the collection system for waste batteries.....	23
Satin I., Koltyk O., Panchenko O. Estimation of debris waste generation.....	34
Zalozh V. Innovative approaches to automation of ship's ballast water treatment and disinfection processes.....	51

CIVIL SAFETY

Holinko V., Kuznetsov O., Holinko O. Improvement of explosion hazard monitoring systems for technogenic facilities.....	62
Tsiuriupa Yu., Sakhnovska V. Sick building syndrome: uncertainty of causes and challenges of classification.....	74

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Rogozhin O., Trofymchuk V., Khlobystov Ie. Possible models of regional environmental and economic assessment of engineering and geological hazards impact on the stability of buildings and structures.....	84
Bushueva N., Lobok Ye., Murovansky G. Management of innovative projects and products in the conditions of digitalization and turbulent environment.....	101
Mashkov O., Prysyazhny V. Decoderation of satellite images of water protection zones using artificial intelligence system.....	110

Trofymchuk O., Koval R., Zarudnyi O. Methodology for forecasting the number of disabled people from sanitary losses.....	121
Vasylenko V., Okhariiev V., Trysnyuk T., Yushchenko K. Digitalization of personnel management processes for the post-war recovery of Ukraine.....	136
Khudyntsev M., Khomenko O. Automation of standardized cyber insurance processes.....	143
Marushchak V. Mathematical model for aerial image decoding and automated analysis of urban infrastructure.....	154
Prosyankina-Zharova T. Information technologies for decision support systems in regional development management.....	164
Berchun Ya., Telychko R., Klymenkov O. Assessment of changes in the technical condition of damaged multi-story buildings by using artificial intelligence.....	185
INFORMATION FOR AUTHORS.....	199

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDK 336.72:477.42

Maryna Kravchenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** kravchenko.mv@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

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

Illia Sviatohorov, Postgraduate student of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ASSESSING THE ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL BENEFITS OF BLUE-GREEN INFRASTRUCTURE TO INCREASE URBAN RESILIENCE TO CLIMATE CHANGE

Abstract. *Climate change and intensive urbanisation pose large-scale challenges to engineering infrastructure and the livelihoods of the population in cities, in particular in the form of floods, soil degradation, droughts and increased pollution. The study focuses on the use of blue-green infrastructure (BGI) elements to improve climate resilience and ensure multifunctional development of urban areas. The article analyses the international experience of implementing the sponge city concept with a focus on the role of green structures. Particular attention is paid to assessing the costs and benefits of implementing BGI projects, in particular, the relationship between investment costs and positive effects, such as energy savings, carbon sequestration, improved air quality, and reduced urban heat island intensity. A comprehensive method for assessing the economic and environmental performance of BGI's facilities has been developed, including quantifying energy savings, determining the amount of CO₂ sequestration, oxygen production by green structures, and economic evaluation of the benefits of oxygen release. The method also includes an analysis of environmental benefits throughout the life cycle of BGI's facilities, calculation of life cycle costs and estimation of construction costs*

for individual infrastructure elements. For the applied assessment of economic and environmental benefits, a calculation based on green pavement was made, taking into account its impact on climate change mitigation. Design solutions aimed at reducing the heat load in the urban environment are proposed, in particular, the potential of facade and roof structures to improve cooling and moisture retention efficiency is revealed. The possibilities of using BGI elements for cooling the urban microclimate are determined. The study was carried out as part of the international Erasmus+ and ClimEd projects aimed at developing climate-oriented education and sustainable urban planning.

Keywords: blue-green infrastructure, green coatings, green facades, green walls, rain garden, climate change mitigation, climate change adaptation, cost analysis.

М.В. Кравченко, Т.М. Ткаченко, О.С. Волошкіна, Л.О. Василенко, І.О. Святогор

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

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНИХ І ЕКОЛОГІЧНИХ ПЕРЕВАГ БЛАКИТНО-ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ МІСТ ДО ЗМІН КЛІМАТУ

Анотація. Кліматичні зміни та інтенсивна урбанізація спричиняють масштабні виклики для інженерної інфраструктури та життєдіяльності населення в містах, зокрема у вигляді паводків, деградації ґрунтового покриття, посух і зростання рівня забруднення. Дослідження зосереджено на застосуванні елементів блакитно-зеленої інфраструктури (BGI) для підвищення кліматичної стійкості та забезпечення багатофункціонального розвитку урбанізованих територій. Проаналізовано міжнародний досвід впровадження концепції міста-губки з акцентом на роль зелених конструкцій. Особливу увагу приділено оцінці витрат і вигод від реалізації проєктів BGI, зокрема встановлено взаємозв'язок між інвестиційними витратами та позитивними ефектами, такими як енергозбереження, секвестрація вуглецю, покращення якості повітря та зменшення інтенсивності міського теплового острова. Розроблено комплексний метод оцінки економічної та екологічної ефективності об'єктів BGI, який включає кількісну оцінку енергозбереження, визначення обсягів секвестрації CO₂, вироблення кисню зеленими конструкціями та економічне оцінювання вигод від вивільнення кисню. Метод також охоплює аналіз екологічних переваг протягом усього життєвого циклу об'єктів BGI, розрахунок вартості життєвого циклу та оцінку витрат на будівництво окремих елементів інфраструктури. Для прикладної оцінки економічних та екологічних вигод здійснено розрахунок на основі зеленого покриття, враховуючи його вплив на пом'якшення наслідків зміни клімату. Запропоновано конструктивні рішення, спрямовані на зниження теплового навантаження в міському середовищі, зокрема розкрито потенціал фасадних і дахових конструкцій щодо підвищення ефективності охолодження та утримання волози. Визначено можливості використання елементів BGI для охолодження міського мікроклімату. Дослідження виконано в межах міжнародних проєктів Erasmus+ та ClimEd, що спрямовані на розвиток кліматоорієнтованої освіти та сталого міського планування.

Ключові слова: блакитно-зелена інфраструктура, зелені покриття, зелені фасади, зелені стіни, дощовий сад, пом'якшення наслідків зміни клімату, адаптація до змін клімату, аналіз витрат.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.7-22>

Вступ

Зміна клімату є одним із найактуальніших викликів сучасності, що посідає провідне місце у глобальному порядку денному. На міжнародному рівні екосистемна адаптація дедалі більше визнається та впроваджується міськими громадами як ефективна стратегія для мінімізації негативних наслідків урбанізації, підвищення кліматичної стійкості та сприяння екологічно збалансованому розвитку. До ключових інструментів екосистемної адаптації належать природоорієнтовані рішення (*Nature-based solutions, NBS*) [1] та концепція міста-губки (*Sponge City*) [2]. Сучасні підходи до проектування міст-губок акцентують увагу на комплексному інтегуванні зеленої та сірої інфраструктури, що утворює блакитно-зелену інфраструктуру (*BGI*) [3]. Окрім регулювання кількості та якості водних ресурсів, зелена інфраструктура забезпечує низку екологічних переваг. Зокрема, рослини відіграють ключову роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату, поглинаючи CO₂ у процесі фотосинтезу та зменшуючи ефект міського теплового острова (*UHI*) шляхом транспірації.

У багатьох містах світу впровадження *BGI* в межах концепції міста-губки розглядається як ключова стратегія адаптації до змін клімату. Китай є світовим лідером у реалізації цієї концепції, що зумовлено кількома факторами. По-перше, країна стикається з гострими екологічними викликами, зокрема забрудненням води та повітря, що створює нагальну потребу у впровадженні ефективних рішень. Відповіддю на ці виклики стала Пілотна програма «Місто-губка», яка демонструє системний підхід до адаптації міських територій. По-друге, Китай активно інвестує в науку та технології, що включає міжнародне співробітництво в галузі сталого водного управління.

У Сполучених Штатах уряд міста Форт-Лодердейл (Флорида) в межах свого Генерального плану окреслив спеціальні зони дій, вразливі до затоплень, з акцентом на зелене управління цими територіями. Крім того, Нью-Йорк останніми роками активно розвиває політику інтегування зеленої інфраструктури, включаючи її у міське планування та актуалізацію нормативних актів задля підвищення кліматичної стійкості [4].

Німеччина стала першою країною в Європі, яка почала впроваджувати *BGI* в рамках концепції міста-губки та Стратегії біорізноманіття Європейського Союзу [5]. Частина субсидій з Європейського фонду регіонального розвитку спрямовується на інвестиції у створення «зеленої Європи, вільної від CO₂», що включає адаптацію до зміни клімату, збереження біорізноманіття та розвиток *BGI*. На відміну від багатьох інших країн, Німеччина має тривалу традицію наукових досліджень та викладання в університетах тем, пов'язаних з екологізацією будівель та міського середовища. Завдяки цьому, а також через специфічні муніципальні можливості, рівень впровадження зелених конструкцій у Німеччині є вищим, ніж у багатьох інших країнах.

Місто Лісабон, що стикається з серйозними ризиками затоплення та ефектом *UHI*, інтегрувало екологічний каркас міста у свій Генеральний план, зробивши його основним елементом просторового планування. У 2016 році в приміській зоні Копенгагена, в районі Естербро, було реалізовано унікальний проєкт *Klima Kvarter* (кліматично стійкий район), який того ж року отримав Міжнародну премію Гуанчжоу за міські інновації [6].

У Польщі активно впроваджують концепцію міст-губок як частину стратегії сталого розвитку, демонструючи її ефективність для екологічних і соціально-економічних цілей. Одним із ключових документів, що обговорює *BGI* в Польщі, є Стратегічний план адаптації до зміни клімату [7], у рамках якого 44 найбільші міста Польщі повинні бути перетворені на сталі з точки зору природи, суспільства та економіки, з особливим акцентом на розвиток *BGI*.

На польсько-німецькому кордоні вже багато років реалізуються транскордонні проєкти з адаптації до зміни клімату. В рамках проєктів *Transgea* («Транскордонне співробітництво з місцевої адаптації до зміни клімату») та *Wikt* (Підтримка кліматичних дій у транскордонному регіоні) створено велику базу даних мікроадаптивних заходів і каталог передового досвіду в галузі *BGI* [8]. Адаптаційні заходи, реалізовані в рамках цих проєктів, є прикладом практичних рішень на локальному рівні і для малобюджетних адаптацій, що можуть бути корисними для впровадження подібних ініціатив в Україні.

Хоча концепція інтеграції сірої та зеленої інфраструктури широко впроваджується в усьому світі, її реалізація вимагає значних інвестицій. Тому для всебічної оцінки доцільності будівництва необхідно детально аналізувати багатовимірні вигоди, які вона забезпечує [9]. Дослідження витрат і вигод від впровадження *BGI* демонструють різні підходи до їх оцінки. Так, Лі та ін. [10] запропонували поділ вигод на економічні, соціальні та екологічні, тоді як автори [11] застосували комплексний підхід, що враховує вартість будівництва та гідрологічні й неточкові екологічні вигоди. Більшість наукових досліджень не враховують усі аспекти витрат і вигод від інтеграції *BGI*, зокрема будівельні витрати, а також її роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату, зниженні ефекту *UHI*, секвестрації CO_2 та покращенні мікроклімату.

Метою роботи є розробка комплексного підходу до оцінки витрат і вигод від впровадження *BGI* в міському середовищі, який включає аналіз капітальних та експлуатаційних витрат, довгострокових економічних і екологічних вигод, зокрема енергозбереження, секвестрації CO_2 , покращення якості повітря, зменшення ефекту міського теплового острова та адаптації до зміни клімату. Додатково досліджується потенціал архітектурних рішень – дизайну фасадів і конструкцій дахів – для підвищення ефективності охолодження міського середовища та утримання вологості, а також визначається роль окремих елементів *BGI* у зниженні температури в містах і поліпшенні мікроклімату.

Основна частина

Оцінка витрат і вигод від впровадження *BGI* є важливою для порівняння з традиційними підходами. Комплексний аналіз враховує як витрати, так і довгострокові екологічні й економічні переваги, що ілюструє рисунок 1.

Зелені покриття розширюють площу міських насаджень, зменшують ефект *UHI* та сприяють охолодженню будівель, що знижує потребу в кондиціонуванні й енергоспоживання влітку [12]. Ефект енергозбереження можна розрахувати за формулою (1):

$$V_{UHI} = N_{elec} \cdot S_{GC} \cdot P_{elec}, \quad (1)$$

де V_{UHI} – економічна вигода від енергозбереження (грошова одиниця); N_{elec} – зменшення споживання електроенергії завдяки зеленим конструкціям (кВт·год/м²); S_{GC} – загальна площа зеленої конструкції (м²); P_{elec} – ціна електроенергії (грошова одиниця/кВт·год).

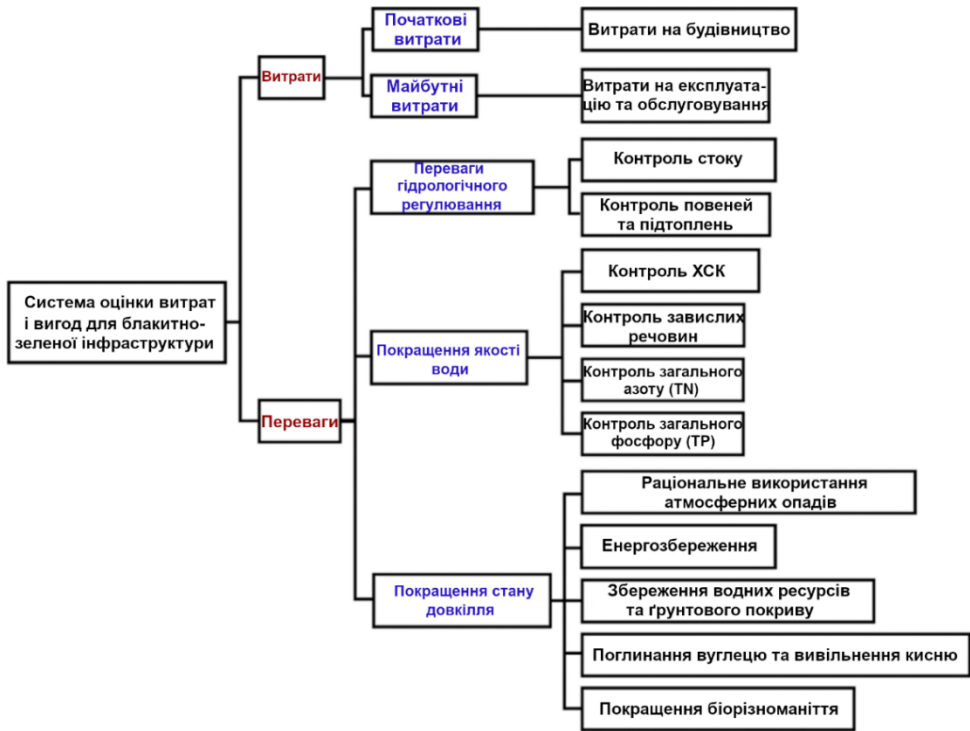


Рис. 1. Система оцінки витрат та вигод від впровадження блакитно-зеленої інфраструктури

Крім того, гектар зелених насаджень може поглинути до $8,1 \times 10^4$ кДж тепла влітку, що відповідає охолоджуючому ефекту роботи 189 кондиціонерів протягом повного дня. Загальна кількість поглиненого тепла визначається, виходячи з площі будівництва зеленого покриття, а споживання електроенергії холодильним обладнанням, необхідне для досягнення подібного ефекту охолодження, вимірюється як N_{elec} .

Зелені конструкції, як ключовий елемент *BGI*, відіграють важливу роль у поглинанні вуглецю та вивільненні кисню, сприяючи зменшенню викидів парникових газів у містах і, відповідно, пом'якшенню наслідків зміни клімату. З огляду на це, кількісна оцінка переваг зеленої інфраструктури щодо секвестрації вуглецю та генерації кисню проводиться за залежностями (2)–(4):

$$V_{cf} = V_{CO_2} + V_{O_2}, \quad (2)$$

$$V_{CO_2} = A_{CO_2} \cdot P_{CO_2}, \quad (3)$$

$$A_{CO_2} = S_{gp} \cdot I_{CO_2}, \quad (4)$$

де V_{cf} – загальні вигоди від секвестрації вуглецю та вивільнення кисню, [грошова одиниця]; V_{CO_2} та V_{O_2} – економічні переваги від поглинання вуглецю

зеленими насадженнями та вивільнення кисню, відповідно [грошова одиниця]; A_{CO_2} – обсяг фіксації вуглекислого газу зеленими насадженнями, [т]; P_{CO_2} – вартість секвестрації вуглецю, [грошова одиниця/т]; S_{gp} – площа нових зелених насаджень, [м²]; I_{CO_2} – інтенсивність поглинання CO₂ рослинністю, [кг/(м²·рік)].

Оцінка обсягу фіксації вуглекислого газу залежить від кліматичних умов, а також від характеристик ґрунту, рельєфу місцевості й типу рослинності. Показник I_{CO_2} визначається на основі польових досліджень або відповідних наукових даних для регіонів із подібними кліматичними умовами. Вартість поглинання вуглецю (P_{CO_2}) визначається з урахуванням місцевих ставок податків на викиди парникових газів або шляхом порівняння з аналогічними даними в інших країнах, якщо вуглецевий податок у досліджуваному регіоні відсутній або його ринковий механізм є недостатньо розвиненим.

Оцінка економічних вигод від вивільнення кисню рослинним шаром зелених конструкцій здійснюється за формулами (5) та (6):

$$V_{O_2} = A_{O_2} \cdot P_{O_2}, \quad (5)$$

$$A_{O_2} = S_{gp} \cdot I_{O_2}, \quad (6)$$

де A_{O_2} – кількість кисню, що вивільняється зеленими насадженнями, [т]; P_{O_2} – вартість промислового виробництва кисню, [грошова одиниця/т]; I_{O_2} – середній показник виділення кисню рослинністю, [кг/(м²·рік)].

Як і у випадку з CO₂, величина I_{O_2} залежить від конкретних кліматичних і екологічних умов регіону, що потребує додаткових емпіричних досліджень або використання даних з аналогічних територій. Оцінка екологічних вигод BGI є важливою для визначення її ефективності, зокрема щодо зменшення викидів CO₂ та генерації O₂. Загальні вигоди протягом життєвого циклу об'єкта можуть бути розраховані за формулою (7):

$$V_B = \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot V_{B,a}, \quad (7)$$

де: V_B – поточна вартість загальної вигоди об'єкта протягом життєвого циклу, [грошова одиниця]; $V_{B,a}$ – середньорічна загальна вигода від об'єкта, [грошова одиниця/рік]; n – розрахунковий термін служби об'єкта, [роки]; i – ставка дисконтування.

Оцінка вигод від секвестрації вуглецю та вироблення кисню здійснюється відповідно до формул (2)–(6), що враховують площу зелених насаджень, інтенсивність поглинання CO₂ та виділення O₂, а також економічні показники вуглецевого оподаткування й вартості виробництва кисню.

Загальна вартість проекту включає як початкові витрати на будівництво, так і витрати на експлуатацію та обслуговування, що дозволяє повноцінно оцінити економічну доцільність використання BGI . Розрахунок вартості життєвого циклу об'єкта BGI здійснюється за формулою (8):

$$V_C = V_{IC} + \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \cdot V_{C,a}, \quad (8)$$

де: V_C – теперішня вартість інженерних витрат об'єкта протягом життєвого циклу, [грошова одиниця]; V_{IC} – вартість будівництва об'єкта, [грошова одиниця]; $V_{C,a}$ – річні витрати на експлуатацію та обслуговування, [грошова одиниця/рік].

Витрати на будівництво різних елементів інфраструктури можуть бути визначені за залежностями (9)–(11):

$$V_{IC,GI} = C_{GI} \cdot S_{GI}, \quad (9)$$

$$V_{IC,R} = C_R \cdot V_{Re}, \quad (10)$$

$$V_{IC,DP} = C_{DP} \cdot L_{DP}, \quad (11)$$

де: $V_{IC,GI}$, $V_{IC,R}$, $V_{IC,DP}$ – витрати на будівництво зеленої інфраструктури, водосховищ і дренажної системи відповідно, [грошова одиниця]; C_{GI} – вартість будівництва зеленої інфраструктури на одиницю площі, [грошова одиниця/м²]; S_{GI} – площа зеленої інфраструктури, [м²]; C_R – вартість будівництва водосховищ на одиницю об'єму, [грошова одиниця/м³]; V_{Re} – об'єм водосховищ, [м³]; C_{DP} – вартість будівництва дренажної мережі на одиницю довжини, [грошова одиниця/м]; L_{DP} – довжина дренажної мережі, [м].

Згідно з існуючими дослідженнями, витрати на експлуатацію та обслуговування зазвичай становлять у середньому певний відсоток від початкової вартості будівництва. У більшості випадків цей показник визначається на рівні 3% від вартості будівництва об'єкта [13].

Для оцінки економічних та екологічних вигод від впровадження зеленого покриття проведено розрахунок з урахуванням його впливу на пом'якшення наслідків зміни клімату. Припустимо, що загальна площа зеленої конструкції становить 500 м², а зменшення споживання електроенергії завдяки її використанню дорівнює 5 кВт·год/м². За вартості електроенергії 4,32 грн/кВт·год економічна вигода від енергозбереження, розрахована за формулою (1), становить 10 800 грн на рік.

Додатково оцінено екологічні вигоди, зокрема секвестрацію вуглецю та вироблення кисню. За умови, що площа зелених насаджень на покритті становить 500 м², а інтенсивність поглинання CO₂ рослинністю – 0,5 кг/(м²·рік), загальний обсяг фіксації вуглекислого газу, розрахований за формулою (4), становить 0,25 т/рік. За середньої вартості секвестрації CO₂ у 1000 грн/т економічний еквівалент поглинання CO₂ становить 250 грн/рік. Аналогічно, при середньому показнику виділення O₂ рослинністю 0,35 кг/(м²·рік) загальна кількість виробленого кисню складає 0,175 т/рік. Враховуючи вартість промислового виробництва кисню 1500 грн/т, економічна вигода від вироблення кисню, розрахована за формулою (5), становить 262,5 грн/рік.

Сумарні щорічні економічні вигоди від зниження споживання енергії, секвестрації CO₂ та вироблення O₂ становлять 11 312,5 грн. Визначено теперішню вартість загальної вигоди протягом 20-річного життєвого циклу об'єкта за формулою (7), приймаючи ставку дисконтування 5%. Результат розрахунку показує, що загальна вигода становить 141 665 грн.

Отримані результати підтверджують доцільність інтегрування зелених технологій у міське середовище як одного з ефективних заходів адаптації до змін клімату. Водночас, окрім екологічних та економічних вигод, важливо

враховувати витрати на будівництво та експлуатацію зеленого покриття. За середньої вартості будівництва 2500 грн/м² загальні інвестиційні витрати для площі 500 м² становлять 1 250 000 грн, а операційні витрати, що включають догляд за рослинністю та технічне обслуговування, складають 3% від вартості будівництва, тобто 37 500 грн/рік. Порівняння з річною економічною вигодою у 11 312,5 грн свідчить про часткове покриття експлуатаційних витрат. У довгостроковій перспективі сукупна вигода у 141 665 грн підтверджує ефективність впровадження зеленої інфраструктури як дієвого заходу для адаптації до змін клімату, зменшення викидів CO₂ та підвищення енергоефективності будівель.

Проте витрати на будівництво та обслуговування можуть суттєво відрізнятися залежно від типу зеленої інфраструктури. У дослідженні [14] проаналізовано емергійні значення загальної вартості різних екосистемних рішень. Результати показали, що інтенсивні зелені покриття мають найвище значення (2,57·10⁹ Дж/м²·рік) порівняно з іншими варіантами, що пояснюється необхідністю застосування складного обладнання, спеціальних субстратів і значними витратами на оплату праці.

Початкові витрати на встановлення можна зменшити завдяки застосуванню технологій, адаптованих із розвинених ринків. Наприклад, згідно з дослідженням [15], вартість зеленого покриття може знизитися на 33–50% після його масштабного впровадження. Подібні закономірності спостерігаються і для інших елементів зеленої інфраструктури. Зокрема, середня вартість встановлення зеленої стіни становить 848 доларів США/м², що суттєво перевищує витрати на вуличні дерева [16]. Отримані результати свідчать, що розробка ефективних стратегій впровадження *BGI* має базуватися не лише на екологічних та економічних перевагах, а й на врахуванні потенційних обмежень та витрат.

У контексті адаптації до зміни клімату одним із важливих напрямів є впровадження конструктивних рішень, спрямованих на зниження теплового навантаження в міських середовищах. Оскільки будівлі займають значну частину міської площі, їх фасади мають суттєвий потенціал для підвищення кліматичної стійкості, який часто залишається невикористаним. Розвиток вертикального озеленення, включно із системами затінення та підвищенням альbedo поверхонь, може істотно зменшити перегрів міста та сприяти покращенню місцевого гідрологічного балансу (рис. 2). Такі заходи можуть реалізовуватися як у формі інтенсивних, так і екстенсивних систем, відповідно до наявних просторових можливостей.

Зелені фасади являють собою базову форму вертикального озеленення, яка полягає у природному або спрямованому розвитку рослинного шару на вертикальних поверхнях. Рослини можуть самостійно прикріплюватися до стін або рости за допомогою спеціальних опорних конструкцій [17]. Середовище для укорінення розташовується ззовні стіни і зазвичай представлено шаром ґрунту або контейнерами на різних рівнях фасаду. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати вертикальні площини для формування зелених екранів, що забезпечують теплоізоляцію, фільтрацію повітря та зниження температури довкілля, як це реалізовано на прикладі фасаду в Лісабоні (рис. 3).

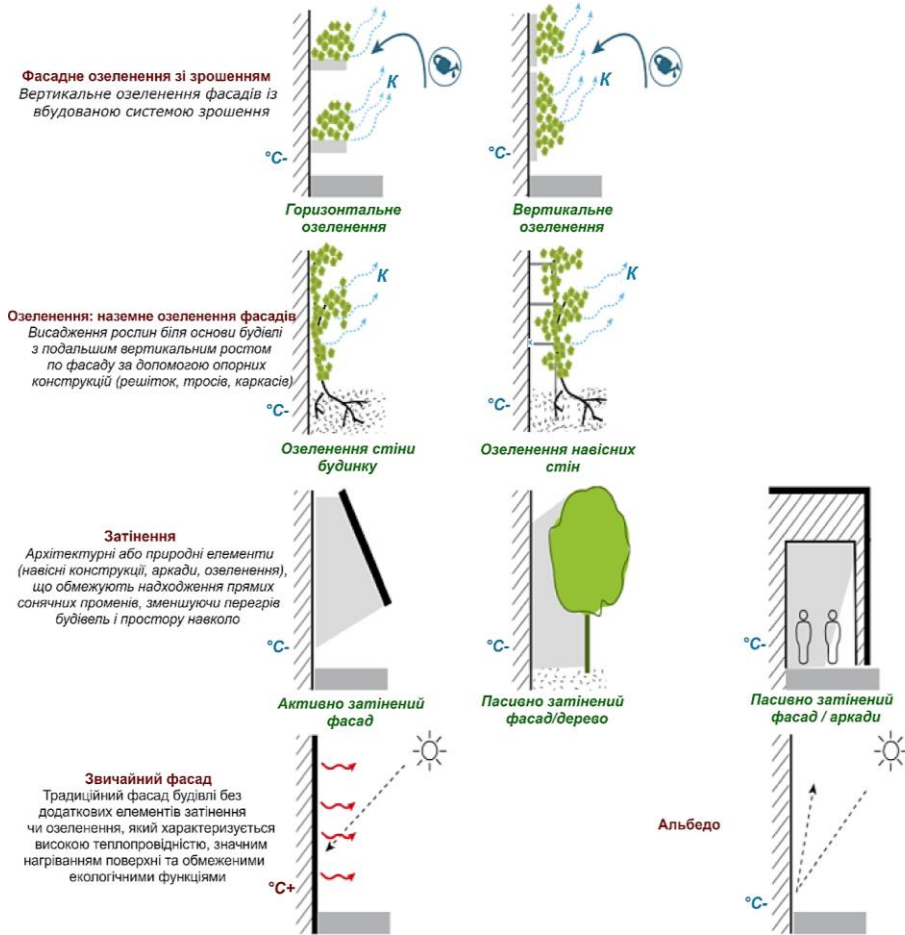


Рис. 2. Потенціал дизайну фасаду для підвищення ефективності охолодження та утримання вологи в міському середовищі



Рис. 3. Вертикальне озеленення на фасаді будівлі в Лісабоні як приклад елемента BGI для пом'якшення міського мікроклімату (авторська світлина)

Живі стіни (або активні системи вертикального озеленення) є складнішою формою інтегрування рослинності у фасади. У таких системах рослинний шар повністю інтегрований у структуру будівлі та утримується спеціальними конструкціями з підкладкою, яка охоплює всю площу фасаду. Типології зелених фасадів і живих стін також відрізняються за видовим складом рослин: для зелених фасадів використовуються переважно виткі рослини, тоді як для живих стін можуть бути застосовані широкий спектр видів, як вічнозелених, так і листяних, за умови ретельного підбору рослин з подібними екологічними вимогами.

Рослинний шар на фасадах виконує важливу кліматорегулюючу функцію: ефект затінення і евапотранспірація істотно знижують температуру поверхні стін у літній період, що підвищує енергоефективність будівель і комфорт проживання. Хоча впровадження систем вертикального озеленення може потребувати значних початкових інвестицій, у довгостроковій перспективі це дозволяє скоротити споживання енергії та експлуатаційні витрати. Крім того, евапотранспіративний ефект сприяє зниженню температури повітря у мікрооточенні озелених фасадів, що є важливим для пом'якшення явища міського теплового острова [18].

Окремий важливий елемент – дахи, які також мають великий потенціал для оптимізації. Серед забудованих поверхонь дахи мають порівнянну горизонтальну площу покриття, проте характеризуються вищим ступенем вибору у впровадженні стратегій пом'якшення міських теплових ефектів та нижчими експлуатаційними витратами порівняно з елементами вуличного каньйону (стінами, дорогами, ґрунтовим покриттям) [19]. Це робить їх перспективним рішенням для підвищення стійкості міського середовища, зокрема шляхом зменшення енергоспоживання будівель (рис. 4).

Найпоширенішими технологічними підходами є використання білих та зелених покриттів із рослинністю. Білі дахи, відомі також як «холодні» дахи, знижують температуру покриття, зменшуючи поглинання сонячної радіації, що сприяє зниженню температури покрівельних матеріалів, стель у приміщеннях та навколишнього повітря, а отже, скороченню потреби в кондиціонуванні на 5–50% [20]. Водночас ефективність білих дахів у літній період може супроводжуватися негативними наслідками, зокрема збільшенням енергоспоживання на опалення в холодну пору року через зменшення акумуляції тепла. Крім того, технологія білих дахів базується на зміні альbedo покрівельної поверхні та спрямована на зниження теплового навантаження в міських районах, зокрема для пом'якшення ефекту *UHI*. Проте дедалі очевидніше, що *UHI* є не ізольованим явищем, а взаємопов'язаним із низкою антропогенно зумовлених екологічних проблем, зокрема концентрацією викидів парникових газів і погіршенням якості повітря в міських районах [21]. Хоча підвищене альbedo дахів сприяє зниженню температури міського середовища, його вплив на якість повітря та скорочення викидів CO₂ є незначним або навіть може мати негативні наслідки.

У зв'язку з цим останнім часом *NBS*, зокрема зелені покриття та стіни, міські газони і зелені насадження, розглядаються як більш стійка альтернатива для зменшення теплового навантаження та підвищення енергоефективності будівель. Зокрема, зелені покриття, на відміну від білих, забезпечують охолодження завдяки процесам випаровування й транспірації в теплий період року, а в холодний сезон зменшують втрати тепла завдяки додатковому шару

грунту, що виконує функцію теплоізоляції. Дослідження показують, що зелені покриття здатні знижувати температуру поверхні даху на 4–12 °С та скорочувати річне енергоспоживання будівель на 2,2–16,7% [22].

Блакитно-зелені покриття, розроблені в першу чергу як технологія *LID* (Low Impact Development) для управління зливовими водами [23], поєднують водоутримувальний (блакитний) шар із зеленими покриттями, що дозволяє подолати обмеження традиційних рішень. Завдяки накопиченню та поступовому постачанню дощової води до ґрунту й рослин вони сприяють підвищенню ефективності випаровування, регулюванню мікроклімату та пом'якшенню міських теплових ефектів, що є важливим у контексті адаптації до зміни клімату. Вологість ґрунту, підтримувана за рахунок акумуляції зливових вод, сприяє зниженню теплового навантаження та підвищенню термічної стабільності будівель [24].

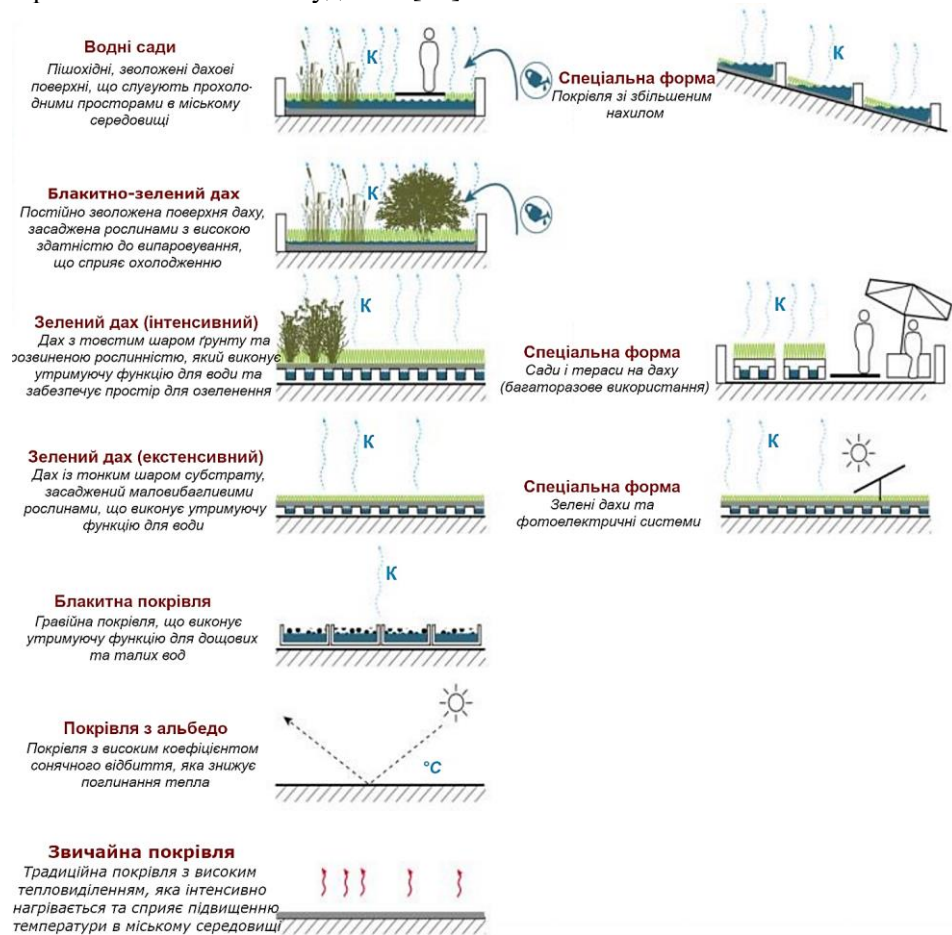


Рис. 4. Потенціал конструкції даху для підвищення ефективності охолодження міського середовища та збереження вологості

Дослідження теплових характеристик блакитно-зелених покриттів підтверджують їхню ефективність у зменшенні температури поверхні, що сприяє зниженню енергоспоживання та викидів парникових газів. Наприклад, автори в рамках дослідження [24] експериментально встановили, що температура поверхні блакитно-зелених покриттів на 5–9 °С нижча, ніж у традиційних дахів.

Останнім часом у сфері архітектури набуває популярності поєднання фотоелектричних систем із рослинністю для створення фотоелектрично-зеленого (PV-Green) даху [25]. Цей підхід сприяє одночасному виробництву відновлюваної енергії та збільшенню зелених насаджень, що сприяє зниженню викидів парникових газів, поліпшенню мікроклімату та адаптації міст до зміни клімату. Завдяки цьому забезпечується багатофункціональна модернізація, що дає змогу реалізувати кілька екологічно важливих функцій в оновленому просторі.

Елементи BGI можуть бути адаптовані до різних просторових умов міського середовища (рис. 5). Зокрема, озеленені водні поверхні, випарні зелені зони та дощові сади доцільно розміщувати у парках, на великих відкритих просторах або у приватних зелених територіях. Плаваючі рослинні острови ефективно застосовуються у стоячих та проточних водоймах, таких як озера, ставки, річки та канали. Блакитно-зелені фасади та покриття можуть бути інтегровані у структуру будівель і перекриттів підземних паркінгів, сприяючи регуляції мікроклімату.

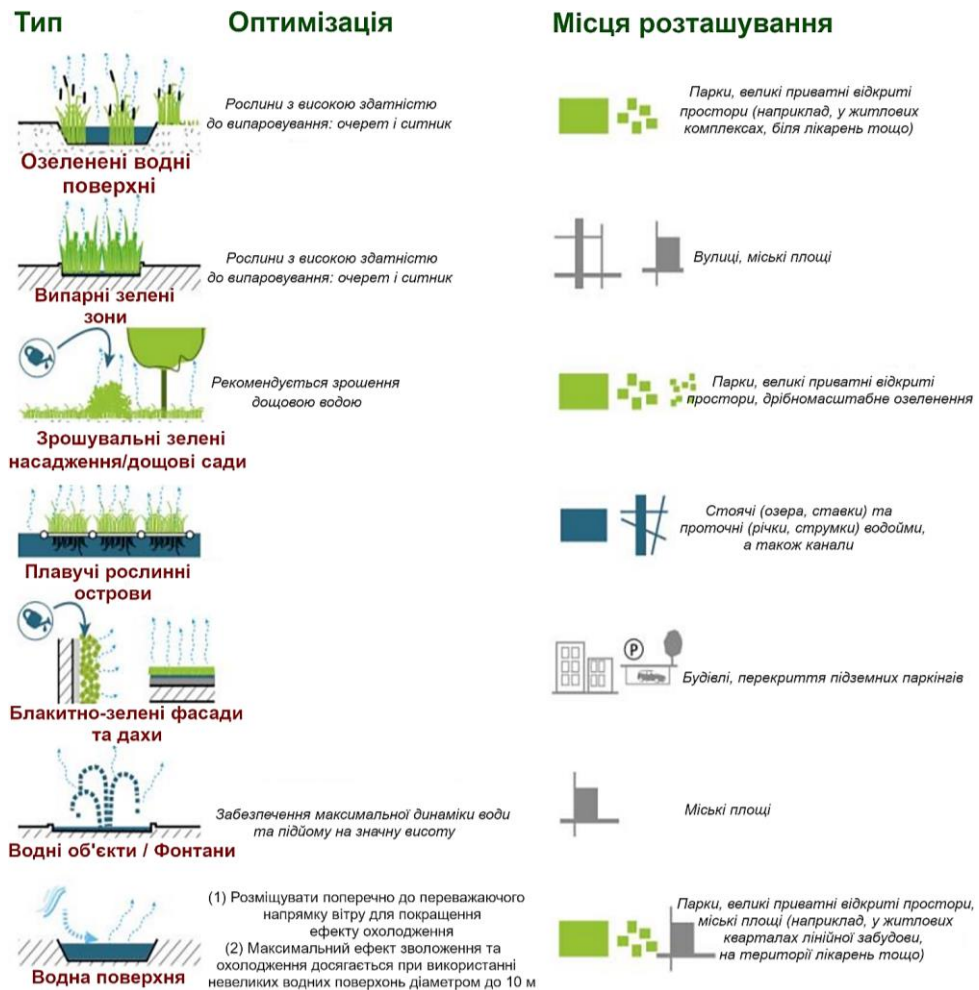


Рис. 5. Потенціал охолодження міського середовища за допомогою елементів BGI

Водні об'єкти та фонтани переважно впроваджуються на міських площах для посилення ефекту охолодження. Додатково, конструкції дощових садів можуть використовуватися у парках, на громадських площах та у житлових районах для покращення мікрокліматичних умов і зменшення інтенсивності ефекту міського теплового острова.

Інтегрування *BGI* у міський простір є складним процесом, що потребує всебічного врахування екологічних, соціальних та економічних чинників. Для ефективного впровадження цих технологій поряд із традиційною сірою інфраструктурою необхідне застосування розвинених інструментів підтримки прийняття рішень, здатних опрацьовувати багатовимірні дані та забезпечувати комплексний аналіз для забезпечення сталого міського розвитку. На практиці процес прийняття рішень часто базується на експертних оцінках місцевих або національних органів влади і обмежується розглядом окремих типів *BGI*, без урахування всього спектра можливих інтегровувальних рішень.

Основними проблемами при впровадженні *BGI* в міське середовище є обмежений рівень наукових знань серед фахівців суміжних галузей, недостатня підготовка громадськості та студентів, дефіцит досліджень і розробок у цій сфері [26]. Також серйозними перешкодами залишаються брак інформації про особливості впровадження та ефективність *BGI*, обмеження фізичного простору в містах, слабе та фрагментоване управління відповідними проєктами [27].

Крім того, існує нестача механізмів та індикаторів, які б сприяли своєчасній розробці та впровадженню політик підтримки *BGI* [26]. Незважаючи на поширення елементів *BGI* у багатьох країнах, в тому числі і в Україні, темпи їхнього впровадження залишаються недостатньо високими. Значним бар'єром є інституційні труднощі: дослідження, проведене в межах проєкту програми «Горизонт 2020» у семи європейських містах, показало, що внутрішньоорганізаційні процеси та нестача технічних компетенцій серйозно впливали на успішність реалізації *BGI* [28].

Для подолання цих викликів необхідно вжити низку заходів. Насамперед потрібна активна державна підтримка впровадження *BGI*, включно з фінансуванням, створенням сприятливого нормативного середовища та розвитком освітніх програм в навчальних закладах. Важливим є також вдосконалення внутрішньоорганізаційних процесів в управлінських структурах, підвищення технічної кваліфікації фахівців, а також залучення громадськості через поширення знань і підвищення обізнаності. Розв'язання цих проблем можливе через систематичне заохочення наукових досліджень, розвиток співпраці між науковими установами та органами влади, створення платформ для обміну знаннями, а також підтримку широкого залучення громадськості до процесу впровадження *BGI*.

Висновки

У межах цього дослідження здійснено інтегровану оцінку економічних і екологічних аспектів функціонування *BGI* через аналіз співвідношення капіталовкладень і отриманих екологічних та енергетичних переваг, зокрема зменшення споживання енергії, накопичення вуглецю, очищення повітря та ослаблення проявів міського теплового острова. Запропоновано методологію кількісної оцінки енергетичних заощаджень, акумуляції CO₂ та виробництва

кисню рослинними системами з подальшим розрахунком економічного ефекту від цих процесів. Дослідження також охоплює аналіз екологічної ефективності на всіх стадіях життєвого циклу елементів *BGI*, а також визначення витрат на спорудження їх окремих складових, орієнтуючись на їхню роль у протидії наслідкам глобальних кліматичних змін.

Проведена оцінка економічних та екологічних вигод від впровадження зеленого покриття підтверджує його значний потенціал для пом'якшення наслідків зміни клімату завдяки зниженню споживання енергії, секвестрації вуглецю та виробленню кисню. Розрахунки показали, що за площі зеленого покриття 500 м² щорічна економічна вигода від енергозбереження, секвестрації CO₂ та виробництва O₂ становить 11 312,5 грн, а сукупна вигода за 20-річний життєвий цикл об'єкта з урахуванням ставки дисконтування 5% складає 141 665 грн. Інвестиційні витрати на будівництво зеленого покриття становлять 1 250 000 грн, а щорічні експлуатаційні витрати – 37 500 грн, що вказує на часткове покриття операційних витрат за рахунок отриманих вигод, проте економічна ефективність повною мірою виявляється у довгостроковій перспективі. Оцінені результати свідчать про доцільність інтегрування елементів зеленої інфраструктури в міське середовище як одного з ефективних засобів адаптації до змін клімату, підвищення енергоефективності будівель і зменшення викидів парникових газів.

Водночас інтегрування *BGI* у міський простір стикається з рядом екологічних, соціальних, економічних та інституційних викликів, що уповільнюють темпи її впровадження. Для подолання цих бар'єрів необхідні комплексні заходи, зокрема активна державна підтримка, вдосконалення нормативної бази, підвищення професійної кваліфікації фахівців, розвиток наукових досліджень і залучення громадськості. Лише системний підхід і співпраця між усіма зацікавленими сторонами забезпечать ефективне впровадження *BGI* як інструменту сталого міського розвитку.

Дослідження виконано в межах міжнародних проєктів Erasmus+ та ClimEd, що спрямовані на розвиток кліматоорієнтованої освіти та сталого міського планування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Nesshöver, C.; Assmuth, T.; Irvine, K.N.; Rusch, G.M.; Waylen, K.A.; Delbaere, B.; Haase, D.; Jones-Walters, L.; Keune, H.; Kovacs, E.; et al. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: An interdisciplinary perspective. *Sci. Total Environ.*, 579, 1215–1227. 10.1016/j.scitotenv.2016.11.106.
2. Yuan, Y.; Zheng, Y.; Huang, X.; Zhai, J. (2024). Climate resilience of urban water systems: A case study of sponge cities in China. *J. Clean. Prod.*, 451, 141781. 10.1016/j.jclepro.2024.141781.
3. Qiao, X.-J.; Liao, K.-H.; Randrup, T.B. (2020). Sustainable stormwater management: A qualitative case study of the Sponge Cities initiative in China. *Sustain. Cities Soc.*, 53, 101963. 10.1016/j.scs.2019.101963.
4. García Sánchez, F.; Solecki, W.D.; Ribalaygua Batalla, C. (2018). Climate change adaptation in Europe and the United States: A comparative approach to urban green spaces in Bilbao and New York City. *Land Use Policy*, 79, 164–173. 10.1016/j.landusepol.2018.08.010.
5. Hu, T.; Chang, J.; Syrbe, R.U. (2020). Green Infrastructure Planning in Germany and China. *Res. Urban. Ser.*, Vol. 6, 99-126 Pages. 10.7480/RIUS.6.96.

6. Engberg, L.A. (2018). Climate Adaptation and Citizens' Participation in Denmark: Experiences from Copenhagen. In *Climate Change in Cities*; Hughes, S., Chu, E.K., Mason, S.G., Eds.; The Urban Book Series; Springer International Publishing: Cham; pp. 139–161. ISBN 978-3-319-65002-9. 10.1007/978-3-319-65003-6_8.
7. Zaręba, A.; Krzemińska, A.; Adynkiewicz-Piragas, M.; Widawski, K.; Van Der Horst, D.; Grijalva, F.; Monreal, R. (2022). Water Oriented City – A '5 Scales' System of Blue and Green Infrastructure in Sponge Cities Supporting the Retention of the Urban Fabric. *Water*, 14, 4070. 10.3390/w14244070.
8. Katalog działań z przykładami dobrych praktyk - Transgea Available online: <http://transgea.eu/katalog-dzialan-z-przykladami-dobrych-praktyk.html> (accessed on Aug 23, 2024).
8. Sample, D.J.; Heaney, J.P.; Wright, L.T.; Fan, C.-Y.; Lai, F.-H.; Field, R. (2003). Costs of Best Management Practices and Associated Land for Urban Stormwater Control. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 129, 59–68. 10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:1(59).
10. Li, X.J.; Deng, J.X.; Xie, W.J.; Jim, C.Y.; Wei, T.B.; Lai, J.Y.; Liu, C.C. (2022). Comprehensive Benefit Evaluation of Pervious Pavement Based on China's Sponge City Concept. *Water*, 14, 1500. 10.3390/w14091500.
11. Saadatpour, M.; Delkhosh, F.; Afshar, A.; Solis, S.S. (2020). Developing a simulation-optimization approach to allocate low impact development practices for managing hydrological alterations in urban watershed. *Sustain. Cities Soc.*, 61, 102334. 10.1016/j.scs.2020.102334.
12. Cascone, S.; Leuzzo, A. (2023). Thermal Comfort in the Built Environment: A Digital Workflow for the Comparison of Different Green Infrastructure Strategies. *Atmosphere*, 14, 685. 10.3390/atmos14040685.
13. Xie, J.; Chen, H.; Liao, Z.; Gu, X.; Zhu, D.; Zhang, J. (2017). An integrated assessment of urban flooding mitigation strategies for robust decision making. *Environ. Model. Softw.*, 95, 143–155. 10.1016/j.envsoft.2017.06.027.
14. Shah, A.M.; Liu, G.; Nawab, A.; Li, H.; Xu, D.; Yeboah, F.K.; Yang, Q.; Zhang, L. (2024). Sustainability and resilience interface at typical urban green and blue infrastructures: costs, benefits, and impacts assessment. *Front. Sustain. Cities*, 6, 1453829. 10.3389/frsc.2024.1453829.
15. Pulselli, R.M.; Pulselli, F.M.; Mazzali, U.; Peron, F.; Bastianoni, S. (2014). Emergy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. *Energy Build.*, 73, 200–211. 10.1016/j.enbuild.2014.01.034.
16. Manso, M.; Teotónio, I.; Silva, C.M.; Cruz, C.O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 135, 110111. 10.1016/j.rser.2020.110111.
17. Manso, M.; Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41, 863–871. 10.1016/j.rser.2014.07.203.
18. Nesci, V.; Ballarini, I.; Rando Mazzarino, P.; Corrado, V. (2024). Living Walls and Green Façades: An Implementation Code for Energy Simulation. *Buildings*, 14, 2040. 10.3390/buildings14072040.
19. Xu, T.; Sathaye, J.; Akbari, H.; Garg, V.; Tetali, S. (2012). Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions. *Build. Environ.*, 48, 1–6. 10.1016/j.buildenv.2011.08.011.
20. Wang, Y.; Wang, Z.-H.; Rahmatollahi, N.; Hou, H. (2024). The impact of roof systems on cooling and building energy efficiency. *Appl. Energy*, 376, 124339. 10.1016/j.apenergy.2024.124339.
21. Wang, Z.-H. (2022). Reconceptualizing urban heat island: Beyond the urban-rural dichotomy. *Sustain. Cities Soc.*, 77, 103581. 10.1016/j.scs.2021.103581.
22. Mihalakakou, G.; Souliotis, M.; Papadaki, M.; Menounou, P.; Dimopoulos, P.; Kolokotsa, D.; Paravantis, J.A.; Tsangrassoulis, A.; Panaras, G.; Giannakopoulos, E.; et al. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 180, 113306. 10.1016/j.rser.2023.113306.

23. Waickowski, S.E.; DeGaetano, S.; Anderson, A.; Amatya, D.M.; Hunt, W. (2024). Plot Scale Evaluation of the Hydrologic and Water Quality Benefits of Blue Roofs Compared to Green and Conventional Roofs. *J. Nat. Resour. Agric. Ecosyst.*, 2, 91–102. 10.13031/jnrae.15887.
24. Eingrüber, N.; Korres, W.; Schneider, K. (2025). Comparison of heat mitigation effects of blue roofs and green roofs on building wall temperature and thermal outdoor comfort based on scenario analyses using 3D microclimate modelling for a dense urban district . 10.5194/egusphere-egu24-9967.
25. Pan, Z.; Wang, C.; Yu, B.; Chen, Z.; Yuan, Y.; Li, G.; Zhang, J.; Xiao, T. (2024). Assessing multifunctional retrofit potential of urban roof areas and evaluating the power and carbon benefits under efficient retrofit scenarios. *J. Clean. Prod.*, 444, 141270. 10.1016/j.jclepro.2024.141270.
26. Bush, J. (2020). The role of local government greening policies in the transition towards nature-based cities. *Environ. Innov. Soc. Transit.*, 35, 35–44. 10.1016/j.eist.2020.01.015.
27. Wamsler, C.; Wickenberg, B.; Hanson, H.; Alkan Olsson, J.; Stålhammar, S.; Björn, H.; Falck, H.; Gerell, D.; Oskarsson, T.; Simonsson, E.; et al. (2020). Environmental and climate policy integration: Targeted strategies for overcoming barriers to nature-based solutions and climate change adaptation. *J. Clean. Prod.*, 247, 119154. 10.1016/j.jclepro.2019.119154.
28. Croeser, T.; Garrard, G.E.; Thomas, F.M.; Tran, T.D.; Mell, I.; Clement, S.; Sánchez, R.; Bekessy, S. (2021). Diagnosing delivery capabilities on a large international nature-based solutions project. *Npj Urban Sustain.*, 1, 32. 10.1038/s42949-021-00036-8.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2025 і прийнята до друку після рецензування 06.05.2025

The article was received 11.02.2025 and was accepted after revision 06.05.2025

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

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

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

Святогоров Ілля Олегович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037 Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-2793-1520> **e-mail:** tall.arh@gmail.com

UDK 628.4.08

Sun Xiaodong, PhD student, Department of Ecology and Environmental Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0770-7660> **e-mail:** 243660941@qq.com

Vitalii Ishchenko, PhD, head of the Department of Ecology and Environmental Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-1096> **e-mail:** ischenko.v.a@vntu.edu.ua

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine

OPTIMISATION OF THE COLLECTION SYSTEM FOR WASTE BATTERIES

Abstract. *Currently, developing countries like China or Ukraine lack effective waste batteries collection. The purpose of this study is to analyse the waste battery collection systems in developed countries and suggest the improvements for the waste battery collection systems in developing countries. Relevant literature on waste batteries management through academic databases, government reports, and industry research channels was analysed. Several developed countries were selected as case studies for in-depth comparative analysis, focusing on the current situation of waste battery collection, including management policies, market size, technological level, etc.*

The differences in waste battery collection models between developing and developed countries have been compared. By analysing successful cases, some best practices were summarized and used for improving the collection of waste batteries in developing countries.

The advices for waste batteries collection system in China have been suggested (including collection points, logistics, etc.) in order to provide reference for the standardization and revision of waste batteries collection in China. The recommendations on separate collection of different types of waste batteries were also developed. This has great practical significance since can help developing countries to achieve waste management goals.

The scientific novelty of this study is that waste batteries collection system has been optimised based on the suggestions for developing countries, while providing efficient waste management. Through a sound pricing strategy and a reasonable logistics system, the collection system for waste batteries has been standardized, facilitating macro level management at the national level, avoiding environmental pollution, and increasing user enthusiasm.

As a next step, the development of relevant recommendations for local authorities and business can be suggested.

Key words: waste batteries; collection; environmental protection; waste management; optimisation.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.23-33>

Introduction

With the development of technology, our lives are increasingly inseparable from batteries. However, the disposal of waste batteries has always troubled us. Batteries contain harmful substances such as heavy metals and acids, which can cause serious environmental pollution if discarded. Therefore, the recycling and treatment of waste batteries has become particularly important.

At present, the current situation of waste batteries management is not ideal. Many people do not know how to dispose of waste batteries, or choose to dispose of them randomly due to various reasons (such as inconvenience and high costs). Besides, the imperfect recycling channels and the lack of effective recycling mechanisms are also important reasons [1].

Batteries have different uses, different specifications and models, different components, which contain heavy metals such as lead, zinc, cadmium, nickel and many other substances harmful to the environment and human body. Waste batteries, if discarded in large quantities in the environment, cause serious harm. Heavy metals cannot be degraded naturally and gradually accumulate through the food chain after being absorbed by organisms. And finally, endangering our own health [2].

European countries are the earliest countries and regions in the world to recycle and manage used batteries. The EU's management of used batteries began in the 1990s, with the first directive on the management of used batteries issued in 1991. This regulation focuses on batteries and accessories containing harmful substances and stipulates that waste batteries should be separated from household waste and collected separately. In some countries, the collection rate of used batteries is as high as 60% (such as Austria, Denmark, and Switzerland). Although there were minor adjustments to the regulations in 2008, 2010, and 2013, the basic provisions are still based on the 2006 regulations [3]. The 2013 survey report [3] by the European Portable Battery Association showed that almost all countries in the European Economic Area had established laws related to battery recycling in accordance with the 2006 regulations. The management of waste batteries in Europe is based on the extended producer responsibility system, and the recycling of waste batteries also extends to all types of batteries. The regulations issued in 2006 greatly promoted the management of waste batteries in Europe, but some problems still exist, such as a large number of waste lead-acid batteries mixed with portable batteries, which means that the recycling rate of portable batteries is very low.

For efficient waste batteries management, a proper collection system must exist. In fact, developing countries like China or Ukraine lack effective waste batteries collection. Therefore, this paper is aimed to suggest some mechanisms and recommendations to improve waste batteries collection based on the experience of developed countries.

Methodology of research

When studying waste batteries collection, a systematic literature review and comparative analysis method were used. The specific steps were as follows:

1. Literature review. First, relevant literature data on waste batteries management were collected throughout academic databases, government reports, and industry research channels. Special attention was paid to the current situation in developing countries, including waste batteries management policies, market size, technological level, and challenges they face. Then, the collected data have been classified with a focus on analysing the policies, practices, and effectiveness of countries at different stages of waste batteries collection, as well as the gaps in technology and infrastructure compared to developed countries.

2. Comparative analysis. Several developed countries (EU, Japan, New Zealand, Australia) were selected as cases studies for in-depth analysis. We compared the differences in the models of waste batteries collection between developing and

developed countries. For example, developed countries typically adopt a combination of voluntary and mandatory policies, while developing countries may rely more on informal collection mechanisms. By analysing successful cases in developed countries, some best practices and lessons learned can be summarized, such as technological innovation, public awareness enhancement, and business participation, which can provide reference for improving waste batteries collection in developing countries.

Through the above steps, it was possible to comprehensively understand and analyse the differences in waste battery collection schemes in different countries, as well as how to learn from the experience of developed countries to promote the progress of waste batteries collection in developing countries.

Research results

Waste batteries collection in developed countries

Waste batteries in the United States are divided into two categories: hazardous waste and non-hazardous waste. The former includes manganese batteries and lithium-ion batteries, while the latter includes button batteries, silver oxide batteries, closed lead-acid batteries, and lead-acid batteries for motor vehicles. According to the regulations of the US Environmental Protection Agency, hazardous waste batteries must be collected according to standardized collection procedures, while non-hazardous waste batteries can be disposed of as household waste. In fact, lead-acid batteries for motor vehicles are collected by motor vehicle dealers or local waste management agencies, while other harmful waste batteries are collected by hazardous substance recycling points near residents [4]. The example is RBRC Corporation, which has established over 25000 battery collection points in the United States and Canada, including every postal district. The company has designed and produced battery collection bins, plastic bags with zippers and specialized battery recycling logos, which are distributed to battery retailers and community waste collection stations in various regions.

In Australia, batteries are divided into two categories: portable batteries and large lead-acid batteries (weight over 5 kg). Large lead-acid batteries are treated as hazardous waste and collected by car repair shops, transfer stations, and waste management agencies, while there is no regulation on the recycling and reuse of portable batteries. The collection and utilization of portable batteries are generally provided by non-profit organizations such as the Australian Battery Recycling Campaign. The generation of discarded portable batteries in 2012 was 14700 tons, with a collection of 403 tons (approximately 2.7% of those generated) [4].

In New Zealand, lead-acid batteries are collected at gas stations, car repair shops, and municipal recycling points. Secondary batteries can be collected and recycled through municipal waste facilities. In fact, all batteries in New Zealand are recycled, but that requires consumers to pay. After battery collection, lead-acid batteries are recycled domestically, while other batteries are either landfilled or transported to other countries for recycling. The focus of battery recycling is still lead-acid batteries, and portable batteries are mostly recycled through voluntary activities, but most of them are landfilled along with household waste [5].

Japan does not have mandatory recycling of secondary batteries, and policies formulated by different local governments vary. However, most secondary batteries are recycled, and the collected batteries are either recycled by companies or stored

as non-combustible waste. Lead-acid batteries are collected and recycled by producers. Since 2001, the collection and recycling of embedded batteries have adopted an extended producer responsibility system [5]. As a member of the Organization for Economic Cooperation and Development and a contracting party to the Basel Convention, Japan complies with the Basel Convention and does not allow the export of waste (including waste batteries) to countries that are unable to process waste, especially developing countries.

In South Korea, the recycling and disposal of waste batteries is based on the extended producer responsibility system, where the government requires battery manufacturers to set recycling targets and impose fines on companies that do not meet the standards. The management of secondary batteries in South Korea is based on the extended producer responsibility system, while the collection of disposable batteries has not been well organized and practiced [5].

Optimization of waste batteries collection system

After studying the waste batteries management system, it has been concluded that it is based on the actual situation of each country and needs to have certain characteristics, such as reasonable pricing, targeting densely populated cities, and closely integrating with logistics management, in order to form a circular and long-term effective recycling system. Combining these factors, optimize the waste batteries management system. Below are some recommendations for optimization of waste batteries collection system.

1. Paid collection of waste batteries.

The paid collection system for waste batteries in Europe, America, and Japan is mainly aimed at the battery production industry. The cost of collection and treating waste batteries is directly deducted from the income of companies, otherwise the cost waste batteries collection is added to the retail sale prices. By gradually phasing out waste batteries through market regulation, the collection rate is increased.

While this strategy can be used in Ukraine (relevant regulations are submitted to Ukrainian Parliament), it is not suitable for China due to the national conditions, and there have been many studies on the paid collection system for waste batteries, which has not been implemented [6]. Unlike developed countries, the Chinese waste trading industry has been preserved for a long time in Chinese consumer awareness. The paid collection system that directly converts waste batteries in users' hands into currency through the sale of waste products is more suitable for China's national conditions.

Direct paid collection of waste batteries is not in line with the actual situation in China, and the specific reasons are as follows:

- direct offsetting the price of waste batteries requires a large amount of investment from companies, which can be described as a risk investment, but the return rate is unknown;
- converting waste batteries into currency will accumulate a large amount of waste batteries in a short period of time, suddenly increasing the difficulty of disposing of waste batteries;
- converting waste batteries into currency will make it difficult for a small number of users to pass them off as real, making collection work more difficult and causing economic losses for companies;
- sudden emergence of a large number of waste batteries that cannot be processed can cause environmental pollution and harm;
- setting up collection stations requires a large amount of human resources.

2. Exchange of waste batteries for other items.

Battery manufacturers implement the practice of exchanging old batteries for new ones for customers who purchase batteries. Each old battery can be offset by a certain amount, mainly in supermarkets or large stores. This has achieved certain results, but still cannot comprehensively solve the problem [7].

The strategy of old batteries exchanging for new ones has achieved some success because companies do not require prior investment and reduce risks. Employees at battery sales points can take on the role of sorting and collection. In addition, the policy of replacing old batteries with new ones ensures a balance between used and new batteries, without causing short-term compression or vacancies. However, due to the widespread generation of waste batteries, exchanging them for new ones still cannot increase the level of waste batteries collection. The collection of waste batteries requires a balanced system that can continuously provide a certain amount of waste batteries, while reducing investment risks for enterprises and facilitating national policy adjustments. Reasonably offsetting waste batteries is suitable for the current situation in China.

If waste batteries are converted into a convenient way of life, it will be much better. For example, if 4 waste batteries have a collection value of 1 USD, it means that 4 batteries can be converted into 1 USD for convenience. For students, it can be converted to washing clothes and taking the school bus, for city citizens – taking a bus once, subscribing to some magazines, purchasing drinks from vending machines. Unmanned vending machines do not require big investments and management efforts, but the collection of waste batteries is not directly converted into profits. Therefore, the waste batteries collection industry can provide more convenience and public welfare, decreasing citizens' awareness. Converting waste into a convenient way of life is not yet common, including both China and Ukraine, but users have expressed recognition and support for this method.

Optimization of waste battery logistics system

The logistics of waste battery collection cannot rely on traditional waste management logistics. Providing such a logistics system requires a many efforts and financial resources, and needs the use of other logistics systems. In traditional logistics systems, waste batteries are sent through distributors to manufacturers and finally arrive at plants. Many developed countries also adopt this method to form a certain standardized process, but it is not suitable for the current situation in developing countries like China or Ukraine due to the lack of extended producer responsibility. There is no standardization and that may cause environmental pollution in local areas. After waste battery collection bins are installed in the community, that can provide initial results. However, such waste battery collection channels take too much time and may encounter resistance from unknown factors at any time, such as community administrators and a few residential users. These logistics methods have their own advantages and disadvantages [8].

There is no unified standard transportation vehicle or standard storage conditions for waste batteries in China and Ukraine. There is an example of Sichuan province in China, where amount of waste batteries generated is about 4000 tons per year. Due to the lack of a disposal site, the city of Chengdu alone currently accounts for nearly 400 tons of waste batteries, which have been stored for 9 years and still cannot be disposed of. This is a typical situation for developing countries, where no standardized collection system is established and no logistic chain is built up.

In Ukraine, there is also some amount of waste batteries collected by non-governmental organisations, which still are not recycled due to the lack of financing and appropriate facilities. Establishing a waste battery disposal factory can solve the issue. This means that there will be a logistics endpoint for waste batteries, and the selection of logistics key points (hubs) will affect the entire logistics cost. The waste batteries collected in various areas will be transported to logistics hubs for accumulation. After reaching a certain quantity, they will be transferred to the logistics endpoint, which is the waste battery recycling factory, which forms a logistics network for waste battery recycling. Waste batteries collection bins can be installed in schools, communities, and streets, encouraging citizens to collect and transfer waste batteries through publicity. Through this method, a certain amount of waste batteries can be accumulated in a short period of time.

The flow chart of battery collection logistics system optimization is shown in Fig. 1.

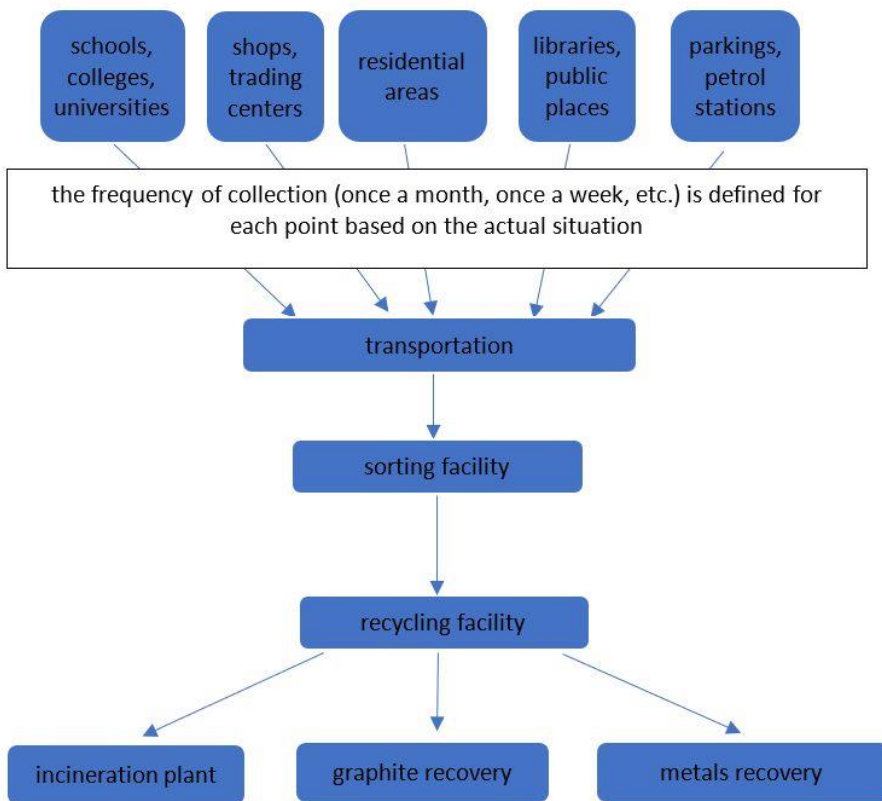


Figure 1. The flow chart of battery collection logistics system optimization

Overall, the main issue in the current waste battery management industry is the lack of smooth circulation and the inability to form an effective resource loop. In the case of China, that includes the following.

1. The destination of the waste batteries collected is unknown, and the market is irregular. Currently, other business models such as battery banks and battery swapping in China are still at the stage of small-scale application. In the on-board sales model, the ultimate right to use and ownership of the battery belongs to the consumer. Consumers can sell waste batteries to companies through trade in or

directly dispose of them. But the reality is that a large number of used batteries flow into illegal channels, even causing a phenomenon of "inverted" prices for new and old batteries. It is understood that according to current policies, sellers have the main responsibility for collection, and battery manufacturing and recycling companies have corresponding responsibilities. However, due to the high prices of upstream raw materials in recent years, the high profit margins have driven informal market entities to purchase scrapped batteries in a form similar to "auctions". At the same time, Chinese regulations have not clearly defined the responsibility of consumers for collection, and consumers have no responsibility or obligation to dispose of waste batteries, lacking effective binding force. According to market estimates, only about 30% of waste batteries enter formal recycling channels.

2. Poor domestic transportation and circulation. The transportation requirements and packaging costs of waste batteries are high, and the phenomenon of non-standard transportation often occurs. In terms of regulatory standards of China, the "List of Dangerous Goods" classifies waste batteries as Class 9 dangerous goods and requires Class II packaging, which has high requirements for packaging strength and cost. According to the "Regulations on Road Transport of the People's Republic of China" and the "Regulations on the Administration of Road Transport of Dangerous Goods", transport units and vehicles are required to have corresponding licenses, the condition of the vehicles must meet the first level standards, and vehicle drivers, loading and unloading management personnel, and escort personnel must obtain corresponding professional qualification certificates. The "Management Regulations for Battery Recycling and Utilization Part 1: Packaging and Transportation" also requires that if there are dangerous situations such as leakage, deformation, fire, and water immersion in batteries (Class B batteries), special protective measures should be taken for their packaging and transportation. At present, professional battery transportation vehicles are not only rare, but also quite expensive. In the absence of strict supervision, companies lack the willingness to seek compliant transportation. Besides, the procedures for waste batteries transportation across provinces are cumbersome and costly. According to the "Management Measures for the Transfer of Hazardous Waste", the cross-provincial transfer of hazardous waste requires joint approval from environmental authorities of the two provinces where the hazardous waste is transferred and received, and can only be transferred after approval. The procedures are complicated and the cost is high. At the same time, based on the current industrial situation, some provinces and regions in China have not yet established strong recycling bases, making it difficult to effectively dispose of waste batteries in their own provinces. This has led to a large number of waste batteries having to be processed into powder before transportation, further reducing production efficiency and increasing costs.

3. Overseas waste batteries cannot be recycled. Currently, there are certain policy barriers to the transportation of waste batteries from abroad, and China's import policies are becoming increasingly strict. In November 2017, the European Commission passed the proposal for a new regulation on the transportation of waste in Europe, which, in conjunction with the requirements of the New Battery Law, clarifies that waste batteries can be transported out of the EU if permitted by the receiving country and provided that they can be proven to be non-toxic after import and meet relevant safety requirements. Currently, the vast majority of countries comply with the Basel Convention, allowing the export of waste batteries to countries with processing capabilities. In contrast, in recent years, China has become increasingly strict in its import policies for waste batteries, gradually tightening the import of all solid waste.

Waste batteries collection is crucial for environmental protection and resource recovery. Here are some additional suggestions for effective battery collection:

1. Public awareness campaigns

Educational programs: inform the public about the importance of waste batteries collection and the environmental hazards of improper disposal.

Social media outreach: use social media platforms to share information, tips, and updates about waste batteries collection initiatives.

2. Convenient collection points

Retail locations: partnership with electronics and automotive retailers to set up collection bins for used batteries.

Community centres: place collection bins in easily accessible public places like community centres, libraries, and schools.

3. Mobile collection points

Scheduled events: organize periodic collection events in neighbourhoods or at community festivals to encourage residents to bring in their used batteries.

Mobile collection units: use vehicles equipped to collect waste batteries from various locations.

Recommendations on separate collection of different types of waste batteries

Waste batteries should be separated from other waste in the collection process. If it is put together with other household waste, there will be numerous issues. The fermentation will be affected by the metal and mercury contained in the waste composting treatment [9]. If waste is incinerated, the high mercury content in the flue gas will affect the quality of the air treatment and pollute the air. If waste is landfilled, heavy metals in the battery will penetrate into the underground and pollute the soil and groundwater.

Waste batteries must be collected separately, so that the battery can be recycled and prevented the spread of harmful substances.

For common dry batteries, one should put them directly into the official garbage bin and does not collect them in a centralized manner (along with alkaline batteries, lithium batteries, and nickel hydrogen batteries).

For batteries with high levels of harmful substances, including most button batteries, nickel cadmium batteries (old-fashioned rechargeable batteries), etc., if there is a waste battery recycling agency nearby, one should deliver it there (such as some neighbourhood committees, environmental protection associations, etc.); if there are no recycling agencies for waste batteries nearby (like in most cities and rural areas), one should contact the local environmental protection department or send waste batteries to recycling agencies in other cities.

Specifically, if a large number of waste batteries have been collected, one should classify them first and then dispose of separately according to the aforementioned suggestions. All types of waste batteries should not be managed together [10]. In the absence of effective recycling technology and economic conditions, the government does not encourage centralized collection of waste batteries that have not met the national low mercury or mercury free requirements. But, in many cases, if the primary technology for waste batteries treatment is shredding followed by pyrometallurgy or hydrometallurgy, no classification is needed since all the batteries will be processed together.

Recommendations for the efficient management of waste batteries:

1. Strengthen the classification, collection and management of waste batteries.

In the engineering analysis of environmental impact assessment for newly built, renovated, and expanded battery manufacturers, not only should the raw materials, processes, and finished products containing heavy metals and harmful substances meet the emission standards, but also the after-sales recycling and utilization of products should be evaluated and analysed. Manufacturers should achieve clean production to facilitate the recycling and utilization of their products. Environmental protection and relevant departments should increase their supervision and management efforts, regularly or irregularly monitor the recycling and utilization situation. In the environmental impact assessment, based on the production scale, it is recommended to establish a production line for the treatment of old battery renewable resources, effectively promoting the recycling and utilization of renewable resources.

2. Encourage the production of environmentally friendly batteries.

Batteries containing heavy metals and mercury should have relevant labels for easy recycling and classification. The government should relax policies in tax or other areas to encourage the production of green and environmentally friendly batteries. Adopting computer network control and utilizing system functional module data transmission technology to sort waste batteries [11]. Extracting and recycling metal substances such as zinc, manganese, silver, mercury, cadmium, and iron, and using furnace slag to make building materials, environmentally friendly treatment of unusable substances can be carried out. This overcomes the shortcomings of the previous complex processes, long process flows, and high treatment costs, and achieves a comprehensive utilization of harmless, resourceful, and stable waste battery treatment.

3. Improve the awareness of all people on the separation and collection of waste batteries.

Environmental awareness of the entire society must be enhanced through education on environmental protection from kindergarten onwards, and making the collection of waste batteries habitual and standardized. Besides, research efforts on the harmless treatment process of waste batteries must be increased, and authorities should provide policy or financial support for treatment processes and achievements that are pollution-free, low-cost, less energy consuming, and have quick results, so that discarded waste batteries can enter a virtuous cycle of production – consumption – regeneration.

Conclusions

This paper proposes an optimization plan for the waste battery collection system. Through improved pricing strategies and reasonable logistics systems, the waste batteries collection system is standardized, which is easy to be managed by the national macro level, forms an industrial scale, avoids environmental pollution, and can increase user enthusiasm. In order to improve the current situation of waste batteries recycling, the following aspects can be taken into consideration:

1. Enhance public awareness: through various means such as publicity, lectures, community activities, etc., raise public awareness of the importance of waste batteries collection. Let everyone understand that protecting the environment is protecting ourselves.

2. Establish collection channels: the government can establish specialized collection points or cooperate with relevant companies to establish effective waste batteries management mechanisms. At the same time, encourage communities, schools, companies and institutions to establish their own collection systems and form a collection network that covers the entire society.

3. Promote reusable batteries: encourage companies to develop and produce reusable batteries to reduce environmental pollution. At the same time, rewards will be given to users who use reusable batteries to increase their enthusiasm for recycling.

4. Technological innovation: increase research and development efforts on waste batteries treatment technology, and find more environmentally friendly and efficient recycling methods. For example, developing an intelligent collection system to achieve automatic battery classification and recycling through IoT technology.

5. Strengthen the laws and regulations: develop and improve relevant laws and regulations to regulate the collection and disposal of waste batteries. Violations of regulations should be punished in accordance with the law to form an effective deterrent force.

It is necessary to enhance the environmental awareness of the entire society, improve people's comprehensive quality, constantly change people's attitudes, and let environmental protection concepts gradually enter people's daily lives, becoming a habitual behaviour of the people, thus making the collection of waste batteries a part of people's daily lives.

REFERENCES

1. Wasay, S.A., Parker, W.J. & Van Geel, P.J. (2001). Contamination of a calcareous soil by battery industry wastes. 1. Characterization. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28, 341–348.
2. Li, J., Xu, H., Li, J., Chen, X., Zhang, Y., Liu, W., Li, W., Han, C., An, S., Wang, S. & Qiu, X. (2023). Construction of Inorganic-Rich Cathode Electrolyte Interphase on Co-Free Cathodes. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(22), 26627–26636.
3. Sun Mingxing. Research on the Recycling Path and Management System of Waste Batteries in China. Master's thesis, Shandong University, 2016.
4. US-EPA (United States Environmental Protection Agency) (2012) Guidelines for Water Reuse. EPA/600/R-12/004, USEPA Office of Wastewater Management, Washington, United States. Available at: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100FS7K.pdf>
5. Sun, C., Zhao, B., Cui, R. D., Mao, J., Dai, K. H., Chen, H. Z., Zhang, X. & Zheng, J. C. (2023). In Situ-Constructed Multifunctional Interface for High-Voltage 4.6 V LiCoO₂. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 15(18), 21982-21993.
6. Cooper, A., Reimann, R., Cronin, D., & Noessel, C. (2014). About face: the essentials of interaction design. John Wiley & Sons.
7. Qi, Y. (2022). Realizing the Healthy Development of Jiangsu Power Battery Recycling Industry. *Weishi*, 7, 32–33. (in Chinese)
8. Dong, Q., Tan, Q., Hao, S. (2020). Analysis of the Recycling Model and Economic Efficiency of New Energy Vehicle Power Batteries in Beijing. *Science and Technology Management Research*, 40(20), 219–225.
9. Unger, R., & Chandler, C. (2023). A Project Guide to UX Design: For user experience designers in the field or in the making. New Riders.

The article was received 16.01.2025 and was accepted after revision 24.03.2025

Сун Сяодун, В.А. Іщенко

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ ВІДПРАЦЬОВАНИХ БАТАРЕЙ

Анотація. Зараз у країнах, що розвиваються, – таких як Китай чи Україна, – немає ефективного збору відпрацьованих батарейок. Метою цього дослідження є проаналізувати системи збору відпрацьованих батарейок у розвинених країнах і запропонувати вдосконалення систем збору відпрацьованих батарейок для країн, що розвиваються. Було проведено літературний огляд управління відпрацьованими батареями шляхом аналізу наукових баз даних, урядових звітів та промислових дослідницьких матеріалів. Кілька розвинених країн було обрано, як приклад, для поглибленого порівняльного аналізу, із фокусом на поточну ситуацію зі збором відпрацьованих батарей, включаючи політику управління, обсяг ринку, технологічний рівень тощо.

У роботі порівняні відмінності в моделях збору відпрацьованих батарей між розвиненими країнами та тими, що розвиваються. Аналізуючи успішні приклади, деякі кращі практики були узагальнені та використані для оптимізації збору відпрацьованих батарей у країнах, що розвиваються.

Було запропоновано поради щодо системи збору відпрацьованих батарей у Китаї (включаючи пункти збору, логістику тощо), щоб забезпечити стандартизацію та перегляд збору відпрацьованих батарей. Також розроблені рекомендації щодо роздільного збору різних видів відпрацьованих батарей. Це має велике практичне значення, оскільки може допомогти країнам, що розвиваються, досягти цілей управління відходами.

Наукова новизна цього дослідження полягає в тому, що систему збору відпрацьованих батарей оптимізовано на основі пропозицій для країн, що розвиваються, для забезпечення ефективного управління відходами. Завдяки обґрунтованій стратегії ціноутворення та розумній системі логістики систему збору відпрацьованих батарей було стандартизовано, що полегшує управління на національному рівні, запобігає забрудненню навколишнього середовища та підвищує залученість населення.

В якості наступного кроку пропонується розробка відповідних рекомендацій для місцевої влади та бізнесу.

Ключові слова: відпрацьовані батарейки; збір; захист довкілля; управління відходами; оптимізація.

Стаття надійшла до редакції 16.01.2025 і прийнята до друку після рецензування 24.03.2025

Сун Сяодун

аспірант кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету

Адреса робоча: Україна, 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0770-7660> **e-mail:** 243660941@qq.com

Іщенко Віталій Анатолійович

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля Вінницького національного технічного університету

Адреса робоча: Україна, 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8464-1096> **e-mail:** ischenko.v.a@vntu.edu.ua

УДК 504:69

Ihor Satin^{1,2}, PhD, Kyiv National University of Construction and Architecture, Acting Deputy Director, Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2028-9791> **e-mail:** satin@nikti.org.ua

Olena Koltyk^{3,4}, Head of the Ukraine Support Team (UST), co-founder of the NGO «ReThink»

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3776-8632> **e-mail:** hi@rethink.com.ua

Olena Panchenko², Head of the Strategic Research at the Housing and Utilities Laboratory, Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3680-7036> **e-mail:** panchenko@nikti.org.ua

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

²Scientific, Research, Design and Technology Institute of Municipal Economy, State Enterprise, Kyiv, Ukraine

³Ukraine Support Team (UST), Kyiv, Ukraine

⁴NGO «ReThink», Kyiv, Ukraine

ESTIMATION OF DEBRIS WASTE GENERATION

Abstract. *As of the beginning of 2022, Ukraine had approximately 8 million residential buildings with a total residential area of 892.1 million square meters. The number of apartments in residential buildings and non-residential structures in Ukraine totaled 15.5 million units. Due to hostilities and regular shelling, the number of damaged and destroyed residential buildings is increasing daily. As of January 2024, over 250,000 buildings have been damaged or destroyed, including 222,000 private homes, over 27,000 multi-apartment buildings, and 526 dormitories. The direct damage from the destruction of these objects is estimated at 58.9 billion USD. The regions with the most destroyed residential buildings include Donetsk, Kyiv, Luhansk, Kharkiv, Chernihiv, and Kherson.*

The generation of a large amount of debris waste requires planning for the demolition of destroyed buildings, dismantling of rubble, transportation to temporary waste storage sites, and the planning and selection of equipment for processing debris waste. Currently, Ukraine lacks an official methodology for estimating the volume of debris waste. To provide scientifically grounded methodological recommendations for estimating the amount of debris waste, the experience of various countries that have experienced technological disasters or natural disasters was studied, including Japan, Canada, and countries in the Middle East. The experience of managing debris waste in the communities of Chernihiv, Kyiv, and Mykolaiv regions was also examined.

As a result of reviewing international experience, it was determined that the most appropriate approach is to use specific waste generation indicators per unit area – the waste generation rate. It is accepted that the area used to determine the volume of debris waste should be within the boundaries of the destruction or demolition (section, floor, or part of the building). A calculation of the waste generation rate was conducted based on the consumption of primary materials for typical series of multi-apartment residential buildings, monolithic-frame multi-apartment residential buildings, and residential buildings in cottage developments, including buildings of preschool and general secondary education institutions and hospitals.

The resulting waste generation rates can be used to estimate the calculated amount of waste generated due to the damage or destruction of residential buildings, buildings of general secondary and preschool education institutions, and healthcare facilities as a result of hostilities, terrorist acts, sabotage, or work to eliminate their consequences. The waste generation rates do not apply to engineering structures, transportation infrastructure, or non-residential buildings.

Key words: debris waste, residential buildings, structures, preschool institutions, general secondary education institutions, hospitals, waste generation volumes.

I.B. Сатін^{1,2}, О.Т. Колтик^{3,4}, О.С. Панченко²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна

²Державне підприємство «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства», м. Київ, Україна

³Ukraine Support Team (UST), м. Київ, Україна

⁴ГО «ReThink», м. Київ, Україна

ОЦІНКА ОБСЯГІВ УТВОРЕННЯ ВІДХОДІВ ВІД РУЙНУВАНЬ

Анотація. В Україні станом на початок 2022 року налічувалось приблизно 8 млн житлових будинків із загальною площею житлових приміщень 892,1 млн кв. м. Кількість квартир у житлових будинках та нежитлових будівлях в Україні становить 15,5 млн одиниць. Внаслідок бойових дій та регулярних обстрілів щодня збільшується кількість пошкоджених та зруйнованих житлових будинків: станом на січень 2024 року таких понад 250 тисяч будівель, з них – 222 тисячі приватних будинків, понад 27 тисяч – багатоквартирних та 526 гуртожитків. Прямі збитки від руйнувань цих об'єктів оцінюються у 58,9 млрд дол. США. Серед регіонів, де зафіксовано найбільше зруйнованих житлових будівель – Донецька, Київська, Луганська, Харківська, Чернігівська та Херсонська області.

Утворення великої кількості відходів від руйнувань потребує планування робіт з демонтажу зруйнованих будинків, розбирання завалів, планування перевезення до місць тимчасового зберігання відходів, планування та підбір обладнання для відновлення відходів від руйнування. Наразі в Україні не існує офіційної методології оцінки обсягів утворення відходів від руйнування. Для надання науково обґрунтованих методичних рекомендацій з оцінки кількості утворення відходів від руйнування вивчено досвід різних держав, які зазнали техногенних катастроф або стихійних лих: Японія, Канада, країни Близького Сходу. Вивчено досвід управління відходами від руйнування в громадах Чернігівської, Київської та Миколаївської областей.

У результаті огляду міжнародного досвіду визначено, що найбільш доцільним є використання питомих показників утворення відходів від руйнувань на одиницю площі – норма утворення відходів. Прийнято, що площа, яка застосовується для визначення обсягів утворення відходів від руйнувань, має бути визначена в межах руйнувань або демонтажу (секція, поверх, частина будинку). Проведено розрахунок норми утворення відходів від руйнувань за витратами основних матеріалів для житлових багатоквартирних будинків типових серій, для житлових багатоквартирних монолітно-каркасних будинків та для житлових будинків садибної забудови, включаючи будинки закладів дошкільної та загальної середньої освіти, лікарні.

Отримані норми утворення відходів від руйнувань можуть застосовуватись для визначення розрахункової кількості відходів, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) житлових будівель, будівель закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я внаслідок бойових

дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків. Норми утворення відходів від руйнувань не визначаються і відповідно не поширюються на інженерні споруди та об'єкти транспортної інфраструктури, нежитлові будинки.

Ключові слова: відходи від руйнування, житлові будинки, споруди, заклади дошкільної освіти, заклади загальної середньої освіти, лікарні, обсяги утворення відходів.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.34-50>

Вступ

В Україні станом на початок 2022 року налічувалось приблизно 8 млн житлових будинків із загальною площею житлових приміщень 892,1 млн кв. м.

Починаючи з 24 лютого 2022 року, через бойові дії зазнають руйнувань та пошкоджень по всій території України житлові та громадські будинки, споруди та інші будівельні об'єкти. Найбільших руйнувань та пошкоджень зазнали житлові та громадські будинки у Донецькій, Харківській, Луганській та Київській областях, а протягом 2022 року значні пошкодження та руйнування отримали будинки у Миколаївській області. За оцінками Світового банку (звіт RDNA3), станом на грудень 2023 року зазначається, що серед всіх пошкоджених житлових одиниць понад одну чверть (547,01 тис. житлових одиниць) повністю зруйновано, інші дві чверті є частково пошкодженими, серед яких: 882,528 тис. житлових одиниць мають незначні пошкодження (до 10%), і 679,382 тис. житлових одиниць мають середні ушкодження (ушкодження 10–40%). Також пошкоджено 230,315 тис. індивідуальних житлових будинків та 67,206 тис. кімнат у гуртожитках.

За оцінками Світового банку, загальна шкода житловому фонду складає 55,9 млрд доларів США. Найбільшої шкоди було завдано багатоквартирним будинкам. Квартири в багатоквартирних будинках продовжують становити найбільшу частку як пошкоджених одиниць, так і витрат на пошкодження, обидва – 86%.

В Україні з метою організації та виконання комплексу робіт з ліквідації наслідків руйнувань під час воєнного стану та у відбудовний період управління відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд, об'єктів незавершеного будівництва, об'єктів благоустрою внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків здійснюється згідно з «Порядком поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків», затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від 27 вересня 2022 р. № 1073 (далі – Порядок № 1073).

Проте, Порядок № 1073 не містить алгоритму визначення попереднього обсягу відходів від руйнувань, що ускладнює планувальні рішення щодо поводження з цим видом відходів, а також значно навантажує органи місцевого самоврядування у разі настання руйнувань.

Оцінка обсягів утворених відходів від руйнувань здійснюється переважно візуально або за об'ємами кузову вантажних автомобілів. Таким чином, існує потреба у розробленні методичних рекомендацій для попередньої оцінки обсягів утворення відходів від руйнувань з використанням накопиченого вітчизняного та світового досвіду.

Постановка завдання. В Україні дії щодо робіт з ліквідації наслідків руйнування та пошкодження будівель та споруд під час воєнного стану та у відбудовний період регулюються Порядком № 1073.

Пунктом 7 Порядку № 1073 визначено, що облік відходів від руйнувань здійснюється на місці їх утворення або на місцях тимчасового зберігання чи інших об'єктах поводження з відходами за встановленою формою, крім того, передбачається створення місць тимчасового зберігання відходів від руйнувань.

Розробка методологічних принципів оцінки обсягів утворення відходів від руйнування дозволить швидко планувати обсяги робіт зі збирання, перевезення та оброблення відходів. Органи місцевого самоврядування зможуть контролювати витрати на проведення робіт з управління відходами від руйнування. Злагоджена організація робіт з управління відходами від руйнувань дозволить підвищити безпеку постраждалих громад, зменшити витрати на збір та перевезення відходів та підібрати технологічне обладнання для оброблення складових відходів від руйнувань.

Методичні рекомендації щодо оцінки визначення обсягів утворення відходів, що утворились внаслідок пошкодження та руйнування будівель та споруд (далі – Методичні рекомендації) розроблено в рамках проекту UA114 «ReThink: Рекомендації щодо управління відходами руйнувань на прифронтових територіях» за підтримки проекту Агентства США з міжнародного розвитку USAID «Зміцнення громадської довіри (UCBI)».

Автори висловлюють подяку пані Наталії Козловській, заступниці Міністра розвитку громад та територій України, за співпрацю у підготовці цих Методичних рекомендацій та допомогу у організації проведення опитування громад.

Автори щиро дякують керівникам і фахівцям громад Київської, Чернігівської, Харківської, Миколаївської областей, ПРООН Україна, представникам будівельної галузі, проектних компаній та архітектурних бюро, які надавали авторам рекомендацій технічну та статистичну інформацію, необхідну для розробки методичних підходів щодо оцінки обсягів утворення відходів від руйнувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для аналізу міжнародного досвіду щодо попередньої оцінки обсягів утворення відходів від руйнувань було проведено літературний огляд за напрямками управління відходами будівництва та знесення, як найближчого виду відходів, а також відходів, які утворюються внаслідок стихійних лих (землетруси), або руйнувань від вибухів чи збройних конфліктів.

Метод розрахунку коефіцієнта генерації (GRC – «generation rate calculation») є поширеним підходом, який використовується для оцінки кількості відходів будівництва та знесення (далі – ВБЗ) [2–4]. Цей метод може бути реалізований під час будівництва, реконструкції, а також демонтажу як на регіональному рівні, так і на рівні проєкту. Принцип цієї методології полягає в отриманні рівня утворення відходів для певної одиниці діяльності (наприклад, кг/кв. м і куб. м/кв. м). У цьому принципі було введено кілька методів з використанням альтернативних параметрів у попередніх дослідженнях, таких як множник на душу населення, екстраполяція фінансової вартості та розрахунок на основі площі.

Кількість утворених відходів розраховують за допомогою індексу утворення відходів, такого як коефіцієнт утворення відходів, отриманий за допомогою статистичного аналізу на основі загальної площі підлоги (GFA – gross floor area) [2–4].

Дослідники здійснили спробу вдосконалення існуючих інструментів кількісного визначення ВБЗ при будівництві нових житлових будинків в Іспанії [5]. Для оцінки приблизного утворення ВБЗ авторами пропонується загальна формула:

$$V_{\text{ВБЗ}} = i_x \times S_3,$$

де: $V_{\text{ВБЗ}}$ – очікуваний об'єм утворення відходів будівництва та знесення, куб. м/кв. м;

i_x – індикаторне значення ($\text{м}^3_{\text{відходів}}/\text{м}^2_{\text{зп}}$);

S_3 – загальна забудована площа ($\text{м}^2_{\text{зп}}$).

З об'єму утворення ВБЗ, який отримано під час аналізу будівельних проєктів та їхньої загальної «збудованої» площі, можна отримати середній показник (i_x) для нових будівельних конструкцій з характеристиками, подібними до тих, що вивчалися в цьому дослідженні.

Таким чином, можна завчасно оцінити кількість утворення ВБЗ під час будівельних робіт шляхом введення у рівняння відповідного значення трьох досліджуваних показників (індикаторних).

Автори дослідження [5] довели, що існує прямий зв'язок між утвореними ВБЗ та збудованою поверхнею через запропоновану загальну формулу. Вводячи до формули відповідне значення показника (i_x), можна – для новобудови з характеристиками, подібними до розглянутих – завчасно оцінити об'єм: загальний ВБЗ, утворений під час усіх будівельних робіт; видів ВБЗ, що утворюються під час усіх будівельних робіт; загальну кількість ВБЗ, утворених на різних етапах будівництва.

Mañà I Reixach та ін. (2000) розробили метод, використаний Інститутом будівництва Каталонії (Іспанія), для оцінки обсягів ВБЗ, утворених на площу поверхні – без урахування ґрунту – для нових будівельних проєктів і проєктів знесення, та показали утворення ВБЗ – $0,125 \text{ м}^3/\text{м}^2$ площі забудови [6].

Cochran та ін. (2007) використали обсяги утворених та відомий склад ВБЗ у регіоні Флориди, щоб отримати метод оцінки утворення ВБЗ як у житлових, так і в нежитлових будівлях. Пропонований склад відходів (за масою): 56% бетону, 13% дерева, 11% гіпсокартону, 8% різного типу відходів, 7% асфальтових покривельних матеріалів, 3% металу, 1% картону та 1% пластику [7].

Solís-Guzmán та ін. (2010) представили математичну модель кількісного визначення та управління ВБЗ в Іспанії на основі статистичних даних проведених будівельних робіт. Модель визначає загальну кількість відходів за категоріями та за проєктом, оцінюючи обсяг у трьох різних категоріях: знесення, втрати матеріалу під час будівництва та пакування. Вихід ВБЗ – нове будівництво – $0,3076 \text{ м}^3/\text{м}^2$; знесення: $1,2676 \text{ м}^3/\text{м}^2$ [8].

У дослідженні Kofowoleola та Gheewala (2009), проведеному в Таїланді, обсяги ВБЗ були оцінені на основі інформації, отриманої з виданих дозволів на будівництво, і показали утворення відходів $21,38$ та $18,99 \text{ кг}/\text{м}^2$ під час будівництва для житлового та нежитлового секторів відповідно [9].

Дослідження, що проведене Llatas (2011), аналізує обсяги ВБЗ, що утворюються в кількох житлових будинках, за трьома фракціями відходів: ґрунт, відходи упаковки та залишки будівельних матеріалів, а рівень утворення ВБЗ (без ґрунту) за результатами дослідження становив $0,1388 \text{ м}^3/\text{м}^2$ [10].

У «Правилах будівництва та демонтажу поводження з відходами – 2016», розроблених для всіх зацікавлених сторін, залучених до утворення, збирання, зберігання, транспортування та поводження з будівельними та демонтажними відходами в Індії, для попередньої оцінки ВБЗ використовується підхід з урахуванням норми утворення відходів на площу будівлі [11].

Внаслідок вибуху у порту м. Бейрут, який стався 4 серпня 2020 р., було зруйновано велику кількість житлових та комерційних будинків міста в радіусі до п'яти кілометрів від епіцентру вибуху [12]. Оцінку кількості ВБЗ проводили експерти ПРООН, які застосували метод об'ємного визначення обсягів утворення ВБЗ. Так, обсяги ВБЗ для зруйнованих житлових будинків оцінювались експертами ПРООН у середньому як 25–35% від об'єму будівлі [12].

У Канаді розроблено національну стандартну методологію для моделювання потенційних фізичних, економічних і соціальних наслідків від землетрусів, ураганів і повеней Hazus Canada. Hazus розроблено Національним інститутом будівельних наук США (NIBS) у партнерстві з Федеральним агентством з управління надзвичайними ситуаціями (FEMA) [13]. Методологія розрахунку обсягів утворення відходів від руйнувань внаслідок землетрусу, як зазначають автори досліджень, використовує емпіричний підхід для оцінки двох різних типів відходів від руйнувань: уламки будівельних конструкцій (вони потребують спеціальної обробки, щоб розбити їх на дрібніші частини, перш ніж їх транспортувати), та другий тип – уламки, що переміщуються бульдозерами та іншими механізмами: цегла, дерево, скло, будівельний вміст та інші матеріали. За цією методологією визначається очікувана частка певного типу відходу з відповідної площі будівлі. Методика передбачає заздалегідь визначену одиницю виміру – «вага відходів на 1000 квадратних футів». Вага відходів визначається для різних типів будинків та враховує конструктивні та неконструктивні елементи.

В Японії, яка потерпає від регулярних стихійних лих, також застосовується методика оцінки обсягів утворення відходів від стихійних лих (мова йде про відходи від руйнування під час стихійних лих). Формула попереднього розрахунку об'ємів відходів від лих наступна [14]:

$$\text{Утворений об'єм} = \text{Сумарна площа пошкоджених приміщень (м}^2\text{)}(A) * \text{Одиниця виходу (B),}$$

де (A) – кількість пошкоджених будівель, помножена на середню площу приміщень у даному регіоні;

(B) – одиниця виходу відходів для різних типів будівель.

Методика враховує тип будинку, основні конструктивні елементи, наявність пожежі під час руйнування та дає змогу оцінити обсяги утворення відходів від стихійних лих в цілому та по основних компонентах – бетон, цегла, пластик, скло, гіпсокартон та інше.

Таким чином, методики, які застосовуються у світі для визначення обсягів будівельних відходів після демонтажу будівлі або її руйнації, як правило,

використовують питомі показники утворення окремих матеріалів або відходів на одиницю площі зруйнованої будівлі. У більшості випадків джерелом даних для формування питомих показників є статистична інформація про обсяги перевезення відходів. Фіксуючи площу будівель, які зазнали руйнувань та відповідно до яких здійснено демонтажні роботи, можна отримати питомі показники утворення відходів.

Водночас слід зазначити, що питомі показники, які отримані в інших країнах світу, не можуть бути застосовані в Україні з ряду причин: знаходження в різних кліматичних зонах, що впливає на параметри огорожувальних та несучих конструкцій; різні методи будівництва та різні будівельні матеріали.

Методологія дослідження

Методологія дослідження включала п'ять етапів:

1. Визначення основних типів будівель в Україні.
2. Опис техніко-економічних параметрів проаналізованих проєктів.
3. Визначення основних видів матеріалів будівель.
4. Розрахунок відходів, що утворюються в досліджуваних будівельних проєктах.
5. Розробка моделі для прогнозування кількості відходів для різних видів відходів.

Оцінка обсягів утворення відходів від руйнувань

В Україні облік відходів від руйнувань наразі здійснюється за фактично вивезеними обсягами і отримати якісну статистичну інформацію про кількість утворених відходів не завжди можливо.

Як правило, обсяги фактично вивезених відходів від руйнування менші за реальні показники. До зменшення обсягів відходів від руйнувань, які обліковують територіальні громади в Україні, приводять наступні чинники: а) тривалий період між руйнуванням та проведенням демонтажних робіт (від кількох місяців до років), під час якого деякі матеріали були вилучені місцевими жителями або військовими для власних потреб; б) частина зруйнованих будівель зазнавала пожеж, а в деяких випадках відходи від руйнувань обліковувались у формі 1-ТПВ як будівельні відходи; в) демонтажні роботи проводились до частини будівлі (досить часто демонтажні роботи в садибній забудові не застосовувались для фундаментів). Про це свідчать інтерв'ю з керівниками територіальних громад Київської, Чернігівської, Харківської, Миколаївської областей [16]. Слід зазначити також, що не всі зруйновані будівлі демонтовані через низку юридичних або організаційних питань.

Таким чином, для розрахунку питомих показників в Україні доцільно використовувати дані проєктів будівництва. При цьому дані, які отримані шляхом фактичного вивезення відходів від руйнувань, можна застосувати для порівняння.

Використовуючи досвід різних країн для оцінки обсягів утворення відходів від руйнувань, необхідно визначити питомі показники на одиницю площі – норму утворення відходів. При цьому, основними показниками визначення розрахункової кількості відходів від руйнувань є об'єм (куб. м) та/або маса (т).

Норму утворення визначаємо для житлових будинків садибної забудови та багатоквартирних будинків, будівель закладів загальної середньої освіти, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я.

Порядок поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків, затверджений постановою Кабінету Міністрів України № 1073 від 27 вересня 2022 р., визначає, що відходи від руйнувань складаються з двох компонентів – основних та супутніх компонентів [15]. До основних компонентів відносяться частини (уламки, бой) будівельних конструкцій, заповнень дверних та віконних блоків, інженерних мереж, санітарно-технічних приладів тощо. До супутніх компонентів відносяться матеріали, предмети, які були всередині або поряд з будівлею у момент пошкодження (руйнування) або під час виконання робіт з його демонтажу, зокрема устаткування, особисті речі, предмети вжитку (меблі, побутова техніка), органічні речовини тощо.

Таким чином, норма утворення відходів від руйнувань також розраховується за основними та супутніми компонентами.

Враховуючи особливості будівництва в Україні у різні періоди, будинки можна класифікувати за наступними типами:

- 1) житлові будинки садибної забудови (одно-, дво-, триповерхові, з мансардою, в тому числі блоковані);
- 2) багатоквартирні будинки: крупнопанельні, крупноблочні та цегляні;
- 3) багатоквартирні будинки: монолітно-каркасні будинки, в тому числі монолітні, монолітно-збірні.

Додатково враховуються проєктні показники будинків, закладів дошкільної та загальної середньої освіти, лікарень.

Витрати основних матеріалів для зведення будівель зазначаються у технічно-економічних показниках, відомостях основних робіт та кошторисах проєктів. Витрати основних матеріалів для зведення будинків садибної забудови зазначаються в типових проєктах періоду 1959–1989 років. Витрати основних матеріалів для зведення багатоквартирних будинків зазначаються в СН-445 «Норми витрати матеріалів і виробів» (в період дії з 1978 по 1991 рік) та типових проєктах періоду 1958–1991 років. Витрати основних матеріалів для зведення житлових монолітно-каркасних будинків наведено з проєктно-кошторисної документації.

Обсяги основних матеріалів для зведення будинків після руйнувань дорівнюють обсягу відходів від руйнувань за основними компонентами – частини (уламки, бій) будівельних конструкцій, заповнення дверних та віконних блоків, інженерних мереж, санітарно-технічних приладів тощо.

Приведені на одиницю площі (питомі показники) обсяги основних матеріалів для зведення будинків будуть дорівнювати загальній нормі утворення відходів від руйнувань або нормі утворення за основними компонентами.

Для розрахунків питомих показників використовуємо наступні площі будівель: площа забудови будинку та загальна площа будинку.

Площа забудови використовується для розрахунку питомих показників садибної забудови, а також для визначення питомих показників азбестовмісних покрівельних матеріалів у багатоквартирних та інших будинках. Загальна площа будинку використовується для розрахунку питомих показників багатоквартирних будинків.

Визначається також і загальна площа руйнування – це частина загальної площі або загальна площа будинку, яка підлягає демонтажу.

Відповідно, площа дорівнює відповідній нормі утворення відходів від руйнувань. Застосування площі в розрахунках має бути в межах руйнування. Тобто, якщо зруйнована частина будівлі, секція або поверх, то відповідно норма утворення відходів від руйнації розраховується в межах площі, яка зазнала руйнувань.

Площу забудови та загальну площу будинку рекомендується отримувати із проєктної документації (за наявності), документації технічної інвентаризації, а також за допомогою засобів дистанційного фотографічного знімання в масштабі 1:2000, 1:5000 (для садибної забудови).

У випадках, коли дізнатись загальну площу будинку неможливо, можна припустити, що загальна площа будинку буде дорівнювати результату множення площі забудови на кількість поверхів (включаючи підвал, горище та технічний поверх).

Норми утворення відходів від руйнувань можуть бути розраховані та застосовані для визначення розрахункової кількості відходів, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) житлових будівель, будівель закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків. Норми утворення відходів від руйнувань не визначаються і відповідно не поширюються на інженерні споруди та об'єкти транспортної інфраструктури, нежитлові будинки через складність будови таких об'єктів та нетиповість.

Таким чином, розрахунок загальної маси утворення відходів від руйнувань за основними компонентами (сума всіх мас за окремими компонентами) в житлових будинках садибної забудови проводиться за формулою:

$$M_i = F_i * a_i, \quad (1)$$

де: M_i – загальна маса утворення відходів від руйнувань за основними компонентами на i -му об'єкті садибної забудови, т;

F_i – площа забудови на i -му об'єкті, кв. м;

a_i – загальна норма утворення відходів від руйнувань за основними компонентами на i -му об'єкті, т/кв. м.

Відповідно, масу утворення основних компонентів відходів від руйнувань в житлових будинках садибної забудови визначають за формулою:

$$m_i = F_i * b_i, \quad (2)$$

де: m_i – маса утворення основного компонента відходів від руйнувань на i -му об'єкті садибної забудови, т;

F_i – площа забудови на i -му об'єкті, кв. м;

b_i – норма утворення за основними компонентами відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т/кв. м.

Визначення кількості відходів від руйнувань за основними компонентами (сума всіх мас за окремими компонентами) в багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я проводять за формулою:

$$M_i = S_i * a_i, \quad (3)$$

де: M_i – загальна маса утворення відходів від руйнувань за основними компонентами на i -му об'єкті у багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я, т;

S_i – загальна площа руйнування i -го об'єкта, кв. м;

a_i – загальна норма утворення відходів від руйнувань за основними компонентами на i -му об'єкті, т/кв. м.

Масу утворення основних компонентів відходів від руйнувань в багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я визначають за формулою:

$$m_i = S_i * b_i, \quad (4)$$

де: m_i – маса утворення основного компонента відходів від руйнувань на i -му об'єкті у багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я, т;

S_i – загальна площа руйнування i -го об'єкта, кв. м;

b_i – норма утворення за основними компонентами відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т/кв. м.

Розрахунок загального об'єму утворення відходів від руйнувань за основними компонентами в багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я проводять за формулою:

$$V_i = M_i / \rho, \quad (5)$$

де: M_i – загальна маса утворення відходів від руйнувань за основними компонентами i -го об'єкта у багатоквартирних будинках, будівлях закладів шкільної, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я, т;

ρ – середня щільність відходів від руйнувань за основними компонентами, т/куб. м; за відсутності фактичних даних рекомендовано в розрахунках прийняти середню щільність рівною 1,5 т/куб. м.

Розрахунок загального об'єму утворення відходів від руйнувань за основними компонентами в житлових будинках садибної забудови проводять аналогічно за формулою 5.

Сума мас утворення основних компонентів відходів за формулами 2 та 4 має дорівнювати загальним масам утворення відходів від руйнувань, визначеним за формулами 1 та 3 відповідно.

Оскільки переважна більшість садибної забудови має покрівлю даху з азбестовмісних матеріалів, то норма такого основного компоненту визначена окремо.

Масу утворення азбестовмісних відходів від руйнувань у житлових будинках садибної забудови, багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я визначають за формулою:

$$m_{аз} = F_i * b_i, \quad (6)$$

де: $m_{аз}$ – маса утворення азбестовмісних відходів від руйнувань на i -му об'єкті садибної забудови, т;

F_i – площа забудови на i -му об'єкті, кв. м;

b_i – норма утворення азбестовмісних відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т/кв. м.

Наступним етапом є визначення обсягів утворення відходів від руйнувань за супутніми компонентами – це матеріали, предмети, які були всередині або поряд з об'єктом у момент пошкодження (руйнування) або виконання робіт з його демонтажу, зокрема устаткування, особисті речі, предмети вжитку (меблі, побутові техніка), органічні речовини, побутові відходи тощо.

Кількість та склад відходів за супутніми компонентами визначається для окремих житлових будівель або для декількох житлових будівель одного типу (наприклад, садибна або багатоквартирна забудова). Для цього розраховуємо норму утворення відходів від руйнувань для супутніх компонентів.

Відповідно до таблиці 6.2 ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження і впливи. Норми проектування» унормовуються квазіпостійні значення навантажень на плити перекриттів, сходи і підлоги на ґрунтах. До квазіпостійних навантажень в житлових будинках відносять вагу меблів, устаткування, особистих речей, предметів вжитку (меблі, побутові техніка), органічних речовин, побутових відходів, та інше, що не є частиною будівельних конструкцій. Тобто, квазіпостійне навантаження на одиницю площі відповідає масі відходів за супутніми компонентами. Квазіпостійне навантаження в 1 кгс/кв. м дорівнює приблизно масі в 1 кг/кв. м.

Для орієнтовного встановлення розподілу супутніх компонентів застосуємо проєктне моделювання для середньостатистичної квартири.

Кількість відходів від руйнувань за супутніми компонентами також розраховуємо на одиницю площі. Для житлових будинків садибної забудови та житлових багатоквартирних будинків слід застосовувати загальну площу будинку (кв. м).

Загальну масу утворення відходів від руйнування за супутніми компонентами в житлових будинках садибної забудови та багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я визначають за формулою:

$$M_i = S_i * c_i, \quad (7)$$

де: M_i – загальна маса утворення відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т;

S_i – загальна площа руйнування i -го об'єкта, кв. м;

c_i – загальна норма утворення відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т/кв. м.

Масу утворення за окремими супутніми компонентами відходів від руйнувань в житлових будинках садибної забудови та багатоквартирних будинках, будівлях закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я визначають за формулою:

$$m_i = S_i * d_i, \quad (8)$$

де: m_i – маса утворення за супутніми компонентами відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т;

S_i – загальна площа руйнування i -го об'єкта, кв. м;

d_i – норма утворення за супутніми компонентами відходів від руйнувань на i -му об'єкті, т/кв. м.

Розрахунок об'єму утворення відходів від руйнувань за супутніми компонентами для житлових будинків садибної забудови та багатоквартирних будинків, будівель закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я визначають за формулою:

$$V_i = M_i / \rho, \tag{9}$$

де: M_i – загальна маса утворення відходів від руйнувань за супутніми компонентами i -го об'єкта житлових будинків, т;
 ρ – середня щільність відходів від руйнувань за супутніми компонентами, т/куб. м; за відсутності фактичних даних рекомендовано в розрахунках прийняти 0,3 т/куб. м.

При наявності наслідків пожежі на площі, для якої визначають обсяги утворення відходів від руйнувань, не враховують маси горючих компонентів. Для супутніх компонентів це – деревина, електричне та електронне обладнання.

Порівнюємо норми утворення відходів від руйнувань, які отримані в нашому дослідженні за проєктними показниками, з питомими показниками утворення будівельних відходів або відходів лиха, які отримані іншими методами або розрахунками. Результати порівняння зведені у табл. 1.

Таблиця 1. Порівняння норм утворення відходів від руйнувань житлових будинків з питомими показниками, отриманими іншими методами

Тип будинку	Загальна норма утворення відходів від руйнувань, т/кв. м	Примітки
1	2	3
Дані, які отримані за проєктними показниками		
Будинки садибної забудови із цегли	2,126	За проєктними показниками
Будинки крупнопанельні 9-поверхові	2,196	За проєктними показниками
Будинки крупноблочні 9-поверхові	2,543	За проєктними показниками
Будинки цегляні 5-поверхові	2,499	За проєктними показниками
Будинок монолітно-каркасний 9-поверховий	1,524	За проєктними показниками
Максимальне значення норми	3,444	За проєктними показниками
Мінімальне значення норми	1,524	За проєктними показниками
Середнє значення норми	2,415	За проєктними показниками

Продовження таблиці 1

1	2	3
Дані, які отримані іншими методами		
Будинки садибної забудови за фактичними даними ПРООН для Київської області	1,628	Даний питомий показник найбільш достовірний через методологію обліку даних про обсяги відходів (див. табл. 2). Але показник може бути занижений через відбір матеріалів до демонтажу та пожежі
За методом оцінки ПРООН у Бейруті, Ліван (багатоквартирні будинки)	1,575	За оцінкою ПРООН, 35% будівельного об'єму становлять будівельні відходи (відходи від руйнувань)
Маса конструкцій і матеріалів за типовими проєктами багатоквартирних будинків, приведених на загальну площу	2,614	Проєктний достовірний показник

Таблиця 2. Фактичні обсяги відходів від руйнувань житлових будинків садибної забудови, які утворились у населених пунктах Київської області (дані ПРООН)

№	Населений пункт	Тип будинку	Площа забудови, що зазнала руйнування	Обсяги вивезених відходів від руйнувань	
			(кв. м)	(куб. м)	(т)
1	Мошун, Гостомель, Горенка	Садибний будинок	10 528,48	11 424	17 136

Вважатимемо, що питомі показники, що визначені іншими методами, мають знаходитись в інтервалі між мінімальним та максимальним значенням норми утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками. У даному випадку цей інтервал становить від 1,524 до 3,444 т/кв. м. Середнє арифметичне значення норми утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками складає 2,415 т/кв. м.

Так, середня маса конструкцій і матеріалів за типовими проєктами багатоквартирних будинків, приведених на загальну площу, 2,614 т/кв. м близька до середньої арифметичної норми утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками. Фактичні показники обліку за даними ПРООН Україна для Київської області також знаходяться в межах інтервалу від 1,524 до 3,444 т/кв. м, що зазначає статистичну релевантність отриманих норм утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками.

Водночас, середнє арифметичне значення норми утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками доцільно використовувати у випадках, коли тип та матеріал будівлі невідомий або змішаний, наприклад застосування цегли та крупних блоків в будівельних конструкціях, зміна функціонального призначення будівлі. У таких випадках доцільно використовувати норму утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками на рівні 2,415 т/кв. м.

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. У результаті дослідження прийнято, що площа, яка застосовується для визначення обсягів утворення відходів від руйнувань, має бути визначена в межах руйнувань або демонтажу – секція, поверх, частина будинку.
2. Основними показниками визначення розрахункової кількості відходів від руйнувань є об'єм (куб. м) та/або маса (т). Методологія розрахунку передбачає визначення обсягів утворення відходів від руйнувань за основними та супутніми компонентами.
3. Проведено розрахунки норм утворення відходів від руйнувань за витратами основних матеріалів для житлових багатоквартирних будинків типових серій, для житлових багатоквартирних монолітно-каркасних будинків та для житлових будинків садибної забудови, включаючи будинки закладів дошкільної та загальної середньої освіти, лікарні.
4. Отримані норми утворення відходів від руйнувань можуть застосовуватись для визначення розрахункової кількості відходів, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) житлових будівель, будівель закладів загальної середньої, дошкільної освіти та закладів охорони здоров'я внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків. Норми утворення відходів від руйнувань не визначаються і відповідно не поширюються на інженерні споруди та об'єкти транспортної інфраструктури, нежитлові будинки.
5. Порівняння норм утворення відходів від руйнувань, які отримані в нашому дослідженні за проєктними показниками, з питомими показниками утворення будівельних відходів або відходів лиха, які отримані іншими методами або розрахунками, показало статистичну релевантність отриманих результатів. Середнє арифметичне значення норми утворення відходів від руйнувань за проєктними показниками складає 2,415 т/кв. м.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1) World Bank. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3) : February 2022 – December 2023 (English). Washington, D.C. : World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099021324115085807/P1801741bea12c012189ca16d95d8c2556a>
- 2) Cha, G.-W., Moon, H. J., Kim, Y.-M., Hong, W.-H., Hwang, J.-H., Park, W.-J., & Kim, Y.-C. (2020). Development of a Prediction Model for Demolition Waste Generation Using a Random Forest Algorithm Based on Small DataSets. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 6997. <https://doi.org/10.3390/ijerph17196997>
- 3) Cheng, J. C. P., & Ma, L. Y. H. (2013). A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. *Waste Management*, 33(6), 1539–1551. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.001>

- 4) Soberón, G., Márquez, S., García, G., Soberón, G., Rea, A., & Higuera, C. (2016). A Comparative Study of Indoor Pavements Waste Generation During Construction through Simulation Tool. *International Journal of Sustainable Energy Development*, 5(1). <https://doi.org/10.20533/ijsed.2046.3707.2016.0032>
- 5) Villoria Sáez, P., del Río Merino, M., & Porras-Amores, C. (2011). Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 30(2), 137–146. <https://doi.org/10.1177/0734242x11423955>
- 6) Mañà I Reixach F, Sagrera I Cuscó A and González I Barroso JM (2000) Base de datos BEDEC. Available at: <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx> (accessed 25 April 2011).
- 7) Cochran KM and Townsend TG (2010) Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach. *Waste Management* 30: 2247–2254.
- 8) Solís-Guzmán J, Marrero M, Montes-Delgado MV, and Ramírez-de-Arellano A (2009) A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management* 29: 2542–2548.
- 9) Kofowoeola OF and Gheewala SH (2009) Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste Management* 29: 731–738.
- 10) Llatas C Bizcocho N and Huete R (2010) Methodological proposal for obtaining an achievement index waste in rehabilitation works in Andalusia. In: Llatas C, Bizcocho N and Huete R. *Proceedings of the Sustainable Building International Conference 2010, Madrid*.
- 11) Toolkit on construction & demolition waste management rules-2016, 1 Edn on June, 2019, <https://npcindia.gov.in/NPC/Files/delhiOFC/EM/Toolkit-on-construction-and-Demolition-waste-management.pdf>
- 12) Demolition waste assessment outside the port of Beirut. UNDP. URL: <https://www.undp.org/lebanon/publications/demolition-waste-assessment-outside-port-beirut>
- 13) Hazus-MH 2.1 Canada, user and technical manual : Earthquake module.[by] M. ulmi ... [et al.]: M183-2/7474E-PDF - government of Canada publications - Canada.ca. (б. д.). Publications du gouvernement du Canada | Government of Canada Publications. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.819558/publication.html>
- 14) Ministry of the Environment Government of Japan. Method for estimating the amount of disaster waste generated (Tokyo 100-8975, Japan : Disaster Waste Management Information, 2014). 64 p. URL: http://kouikishori.env.go.jp/guidance/download/pdf/046_gi14-2.pdf (date of access: 28.11.2024).
- 15) Порядок поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій, терористичних актів, диверсій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків», затвердженим Постановою Кабінету Міністрів України від 27 вересня 2022 р. № 1073.
- 16) Сатін І., Панченко О., Фляшовський В. Методичні рекомендації щодо оцінки обсягів відходів від руйнувань / ред. О. Колтик. Київ : ГО "РЕСІНК", 2024. 68 с. (Препринт). URL: https://decentralization.ua/uploads/library/file/940/Методичні_рекомендації_відходи_від_руйнувань_ReThink_UST.pdf (дата звернення: 28.11.2024).
- 17) Токарчук, Д. М. Особливості утворення і поводження з відходами під час воєнних дій: досвід України. *Економіка, фінанси, менеджмент: актуальні питання науки і практики*. 2022. № 2 (60). С. 109–122. DOI: 10.37128/2411-4413-2022-2-8.
- 18) Сафранов, Т. А.; Приходько, В. Ю.; Михайленко, В. І. Особливості управління та поводження з відходами від руйнувань в регіонах України. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2024, 33: 88-98.
- 19) Шестопалова, Олександра, and Ганна Виговська. "Війна та її екологічні наслідки: аналіз проблеми утворювання відходів руйнування". *Матеріали конференції МЦНД* 03.03.2023; Луцьк, Україна (2023): 96-100.

Стаття надійшла до редакції 17.12.2024 і прийнята до друку після рецензування 07.03.2025

REFERENCES

- 1) World Bank. Ukraine – Third Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA3): February 2022 – December 2023. Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/099021324115085807/P1801741bea12c012189ca16d95d8c2556a>
- 2) Cha, G.-W., Moon, H. J., Kim, Y.-M., Hong, W.-H., Hwang, J.-H., Park, W.-J., & Kim, Y.-C. (2020). Development of a Prediction Model for Demolition Waste Generation Using a Random Forest Algorithm Based on Small DataSets. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(19), 6997. <https://doi.org/10.3390/ijerph17196997>
- 3) Cheng, J. C. P., & Ma, L. Y. H. (2013). A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. *Waste Management*, 33(6), 1539–1551. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.001>
- 4) Soberón, G., Márquez, S., García, G., Soberón, G., Rea, A., & Higuera, C. (2016). A Comparative Study of Indoor Pavements Waste Generation During Construction through Simulation Tool. *International Journal of Sustainable Energy Development*, 5(1). <https://doi.org/10.20533/ijsed.2046.3707.2016.0032>
- 5) Villoria Sáez, P., del Río Merino, M., & Porras-Amores, C. (2011). Estimation of construction and demolition waste volume generation in new residential buildings in Spain. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 30(2), 137–146. <https://doi.org/10.1177/0734242x11423955>
- 6) Mañà I Reixach F, Sàgrera I Cuscó A and González I Barroso JM (2000). Base de datos BEDEC. <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>
- 7) Cochran K.M. & Townsend T.G. (2010). Estimating construction and demolition debris generation using a materials flow analysis approach. *Waste Management* 30: 2247–2254.
- 8) Solís-Guzmán, J., Marrero, M., Montes-Delgado, M.V., & Ramírez-de-Arellano, A. (2009). A Spanish model for quantification and management of construction waste. *Waste Management* 29: 2542–2548.
- 9) Kofowoeola, O.F., & Gheewala, S.H. (2009). Estimation of construction waste generation and management in Thailand. *Waste Management* 29: 731–738.
- 10) Llatas, C., Bizcocho, N., & Huete, R. (2010). Methodological proposal for obtaining an achievement index waste in rehabilitation works in Andalusia. In: Llatas C., Bizcocho N. and Huete R. Proceedings of the Sustainable Building International Conference 2010, Madrid.
- 11) Toolkit on construction & demolition waste management rules-2016, 1 Edición June, 2019, <https://npcindia.gov.in/NPC/Files/delhiOFC/EM/Toolkit-on-construction-and-Demolition-waste-management.pdf>
- 12) Demolition waste assessment outside the port of Beirut. UNDP. URL: <https://www.undp.org/lebanon/publications/demolition-waste-assessment-outside-port-beirut>
- 13) Hazus-MH 2.1 Canada, user and technical manual : Earthquake module.[by] M. ulmi ... [et al.].: M183-2/7474E-PDF - government of Canada publications - Canada.ca. (6. д.). Publications du gouvernement du Canada | Government of Canada Publications. <https://publications.gc.ca/site/eng/9.819558/publication.html>
- 14) Ministry of the Environment Government of Japan. (2014). Method for estimating the amount of disaster waste generated (Tokyo 100-8975, Japan : Disaster Waste Management Information). http://kouikishori.env.go.jp/guidance/download/pdf/046_gi14-2.pdf (date of access: 28.11.2024).
- 15) Procedure for waste management generated due to the damage (destruction) of buildings and structures as a result of hostilities, terrorist acts, sabotage, or elimination works, approved by the Cabinet of Ministers of Ukraine Resolution No. 1073, September 27, 2022 [in Ukrainian].

- 16) Satin, I., Panchenko, O., & Fliashovskyi, V. (2024). Methodological recommendations for assessing the volume of destruction waste. (O. Koltyk, Ed.). Kyiv: NGO "Rethink". https://decentralization.ua/uploads/library/file/940/Методичні_рекомендації_відходи_від_руйнувань_ReThink_UST.pdf (date accessed: 28.11.2024) [in Ukrainian].
- 17) Tokarchuk, D. M. (2022). Features of formation and management of waste during hostilities: the experience of Ukraine. *Economics, Finance, Management: Current Issues of Science and Practice*, 2 (60), 109–122 [in Ukrainian]. DOI: 10.37128/2411-4413-2022-2-8.
- 18) Safranov, T. A.; Prikhodko, V. Yu.; & Mykhailenko, V. I. (2024). Features of management and handling of destruction waste in the regions of Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 33, 88–98 [in Ukrainian].
- 19) Shestopalova, O., & Vyhovska H. (2023). War and Its Environmental Consequences: An Analysis of Destruction Waste Formation Issues. In *Materials of the International Scientific Conference, March 3, 2023; Lutsk, Ukraine* (pp. 96–100) [in Ukrainian].

The article was received 17.12.2024 and was accepted after revision 07.03.2025

Сатін Ігор Валентинович

канд. техн. наук, Київський національний університет будівництва і архітектури, т.в.о. заступника директора Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

Адреса робоча: пр. Повітряних Сил, 31, м. Київ, Україна, 03037

вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2028-9791> **e-mail:** satin@nikti.org.ua

Колтик Олена Тарасівна

голова Ukraine Support Team (UST), співзасновниця ГО «ReThink»

Адреса робоча: вулиця Князів Острозьких, 2, Київ, Україна, 01010

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3776-8632> **e-mail:** hi@rethink.com.ua

Панченко Олена Сергіївна

завідувач лабораторії стратегічних досліджень у ЖКГ Державного підприємства «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут міського господарства»

Адреса робоча: вул. Митрополита В. Липківського, 35, м. Київ, Україна, 03035

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3680-7036> **e-mail:** panchenko@nikti.org.ua

УДК 621.436:629.128.6:656.6

Vitalii Zalozh, PhD, associated prof. of the Department «Engineering Sciences»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5213-6896>

e-mail: zalozh@dinuoma.com.ua

Danube Institute of National University "Odessa Maritime Academy", Izmail, Ukraine

INNOVATIVE APPROACHES TO AUTOMATION OF SHIP'S BALLAST WATER TREATMENT AND DISINFECTION PROCESSES

Abstract. *This research introduces innovative technology for ship's ballast water treatment and disinfection that meets the International Maritime Organization's D-2 water quality standard requirements. The innovative approach to ballast water processing has been developed and validated by the research team at the Danube Institute of the National University "Odessa Maritime Academy" as part of the state-funded research project No. 0124U004399, supported by the Ministry of Education and Science of Ukraine. Environmental monitoring of the Black Sea, conducted by the international scientific community in 2019, revealed a critical deterioration in the state of the marine ecosystem. Over the five-year observation period, a threefold increase in the level of pollution of the marine environment was recorded. The study emphasizes the critical role of ballast water in modern maritime navigation, particularly its significance for vessel stability and operational safety. However, the presence of numerous marine organisms in ballast water poses significant multidimensional challenges, ranging from threats to ecological balance to economic losses and sanitary-epidemiological risks. The transfer of ballast water between different geographical locations facilitates the invasion of non-indigenous microorganisms into new ecosystems, potentially leading to the destruction of local biota and causing substantial economic losses in coastal regions. The developed experimental facility implements a comprehensive approach to ballast water treatment through the sequential application of chemical, ionization, and mechanical processing methods. A key objective is the creation of an automated control system for the experimental ballast water treatment equipment, designed to ensure precise monitoring of technological parameters and optimize laboratory testing efficiency.*

The developed multifunctional ballast water management system is designed for large-tonnage vessels and fully complies with D-2 standard requirements. Experimental studies have confirmed the high efficiency of the proposed technology in eliminating pathogenic microorganisms and purifying ballast water, as documented by laboratory test results. Currently, the system is undergoing type approval and certification procedures in accordance with international standards.

Keywords: *ballast water, marine vessels, treatment, disinfection, invasive species, control system.*

В.І. Залож

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»,
м. Ізмаїл, Україна

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ І ОЧИЩЕННЯ ВОДНОГО БАЛАСТУ СУДЕН

***Анотація.** Робота розглядає представлення інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно зі стандартом якості D-2, затвердженим Міжнародною морською організацією. В межах виконання державного наукового проєкту №0124U004399, що фінансується Міністерством освіти і науки України, науковим колективом Дунайського інституту Національного університету "Одеська морська академія" розроблено та апробовано інноваційну технологію обробки суднових баластних вод. У галузі сучасного мореплавства баластна вода виступає ключовим фактором підтримки стабільності та безпеки експлуатації суден. Проте наявність у ній численних морських організмів спричиняє серйозні виклики, що мають багатовимірний характер – від загроз екологічного рівновазі до економічних збитків та ризиків санітарно-епідеміологічного характеру. Переміщення баластних вод між різними географічними локаціями зумовлює інвазію нехарактерних мікроорганізмів у нові екосистеми. Це явище несе потенційну загрозу деструкції локальної біоти та може спровокувати суттєві економічні втрати для приморських регіонів. Створена експериментальна установка реалізує комплексний підхід до очищення баластних вод шляхом послідовного застосування хімічних, іонізаційних та механічних методів обробки. Ключовим завданням є створення автоматизованої системи керування експериментальним устаткуванням для обробки баластних вод морського походження. Система має забезпечувати прецизійний моніторинг технологічних параметрів та оптимізувати проведення лабораторних випробувань, підвищуючи їх результативність. Розроблена багатофункціональна система управління водним баластом призначена для великотоннажних морських суден та повністю відповідає вимогам стандарту D-2. Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність запропонованої технології у знищенні патогенних мікроорганізмів та очищенні баластних вод, що документально підтверджено результатами лабораторних випробувань. Наразі система проходить процедуру типового схвалення та сертифікації відповідно до міжнародних стандартів.*

***Ключові слова:** баластна вода, морські судна, знезараження, очистка, інвазійні види, система керування.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.51-61>

Вступ

Сучасне судноплавство неможливе без використання баластної води, яка забезпечує стабільність та експлуатаційну безпеку морських суден. Втім, ця вода містить численні морські організми, що створює низку викликів екологічного, економічного та санітарно-епідеміологічного характеру. У баластній воді присутні різноманітні мікроорганізми, включаючи патогенні бактерії, а також яйця, цисти та личинкові форми морських організмів [1]. При потраплянні у нове середовище ці види здатні пристосовуватися, формувати

стійкі популяції та набувати інвазивного характеру, витісняючи місцеві види та порушуючи природний баланс екосистем. Транспортування води з одного географічного регіону в інший призводить до міграції чужорідних мікроорганізмів, що може спричинити деградацію місцевої біоти та негативно вплинути на економіку прибережних територій.

Актуальність. З метою мінімізації загроз, пов'язаних з поширенням інвазивних видів через баластні води, світова спільнота ухвалила Міжнародну конвенцію щодо контролю та менеджменту суднових баластних вод і осадів. Документ, прийнятий у 2004 році, набув чинності 8 вересня 2017 року. Гранично допустимі концентрації життєздатних організмів у баластній воді регламентуються Правилком D-2, затвердженим Міжнародною морською організацією (ІМО) [2, 3].

Екологічний моніторинг Чорного моря, проведений міжнародною науковою спільнотою у 2019 році, виявив критичне погіршення стану морської екосистеми. Протягом п'ятирічного періоду спостережень зафіксовано трикратне збільшення рівня забруднення морського середовища [4].

Порівняльний аналіз забрудненості Чорного та Середземного морів демонструє тривожну тенденцію. За комплексним показником, що враховує концентрацію пластикових відходів, хімічних домішок та важких металів, співвідношення рівнів забруднення становить 95:52 на користь Чорного моря. Це особливо показово, враховуючи, що історично саме Середземне море вважалося найбільш забрудненим водним басейном регіону.

Деградація морського середовища призвела до катастрофічних наслідків для біорізноманіття:

- повне зникнення окремих видів риб (чорноморська сардинела, чорноморська скумбрія);
- тридцятикратне скорочення популяції осетрових порівняно з 1980 роком;
- десятикратне зменшення чисельності представників родини кефалевих.

Істотної шкоди зазнали природні поселення чорноморських мідій через проникнення з корабельним баластом хижого молюска *Rapana venosa*. Дослідним шляхом підтверджено, що одна мідія середнього розміру щодоби фільтрує близько 40 літрів морської води, видаляючи з неї сполуки важких металів та інші хімічні елементи, що становлять небезпеку для морської фауни та людини. Значну загрозу для прибережних екосистем становить поява патогенних вірусів, поширення яких може спровокувати масштабні епідеміологічні наслідки для населення прибережних країн.

Такі драматичні зміни екосистеми підкреслюють критичну необхідність розробки та впровадження ефективних технологій очищення морського середовища, включаючи системи обробки баластних вод. Отож, актуальним залишається завдання розробки інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно зі стандартом якості D-2 міжнародних вимог ІМО Конвенції.

Мета дослідження – представити технологію знезараження і очищення водного баласту суден та розробити автоматизовану систему управління експериментальної установки знезараження і очищення морської баластної води для забезпечення точного контролю технологічних параметрів процесу й підвищення ефективності лабораторних досліджень.

Виклад основного матеріалу дослідження

Реалізація положень Конвенції здійснюється в поетапному режимі, причому основна частина суден, що виконують міжнародні рейси, має завершити перехідний період вже у 2024 році. Передбачається перехід більшості суден міжнародного сполучення від практики обміну баластних вод (BWE) до впровадження комплексних систем управління баластними водами (BWMS) відповідно до стандартів Правила D-2. Конвенція зобов'язує всі судна міжнародного флоту здійснювати контроль баластних вод та осадів згідно зі встановленими нормами та індивідуальними планами менеджменту. Обов'язковими документами також є суднові журнали обліку баластних операцій та міжнародні сертифікати відповідності.

Система управління баластними водами передбачає комплекс заходів з контролю, обробки та заміни баластної води для забезпечення екологічної безпеки [4]. Особлива увага приділяється запобіганню поширенню потенційно небезпечних організмів, здатних порушити екологічну рівновагу [8-11]. Серед основних ризиків виділяють: загрозу біорізноманіттю через витіснення місцевих видів; потенційні ризики для здоров'я населення; економічні втрати у галузях, пов'язаних з використанням водних ресурсів; порушення стабільності регіональних та локальних екосистем [13, 14].

Таблиця 1. Нормативні показники концентрації відповідно до вимог стандарту якості водяного баласту D-2 [5]

Організм і розмір	Концентрація
Будь-який організм: ≥ 50 мкм (зоопланктон)	менш ніж 10 одиниць на 1 м^3
Будь-який організм: $\geq 10 \dots < 50$ мкм (фітопланктон)	менш ніж 10 одиниць на 1 мл (10 000 000 на м^3)
Мікроби: Холера (<i>Vibrio cholerae</i>)	КУО - колонієутворювальна одиниця менш ніж 1 КУО на 100 мл або менше 1 КУО на 1 г зразку зоопланктону
Кишкова паличка (<i>E. Coli</i>)	менше 250 КУО на 100 мл
Кишкові ентерококи (<i>Intestinal enterococci</i>)	менше 100 КУО на 100 мл

В таблиці 1 представлені нормативні показники концентрації відповідно до вимог стандарту D-2 Конвенції ІМО щодо якості баластної води. Судновласники, що експлуатують системи менеджменту баластних вод, зобов'язані дотримуватися встановлених лімітів щодо викиду життєздатних організмів. Нормативні обмеження регламентують наступні показники: концентрація життєздатних організмів розміром від 50 мікрометрів не повинна перевищувати 10 одиниць на кубометр води, а для організмів менше 50 мікрометрів – не більше 10 одиниць на мілілітр. Додатково встановлені граничні значення для індикаторних мікроорганізмів, детальні параметри яких наведені в табл. 1.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр систем управління баластними водами (BWMS), і технологічний розвиток у цій сфері продовжується. Однак

процес впровадження ускладнюється технічними особливостями різних типів суден та обмеженими можливостями суднобудівних підприємств щодо ефективної інтеграції цих систем [15].

Очищення баластних вод здійснюється із застосуванням комплексу фізико-механічних та хімічних методів обробки, що схематично відображено на рис. 1. Сертифіковані системи управління баластними водами (BWMS) переважно базуються на інтегрованому підході, поєднуючи декілька технологічних процесів. Первинна обробка зазвичай включає механічну сепарацію крупних частинок за допомогою фільтраційних установок або гідроциклонних пристроїв. Дрібні організми можуть проходити крізь автоматизовані самоочисні фільтрувальні системи з розміром пор близько 40 мкм.

Серед інших фізичних методів обробки виділяють [12]:

- застосування ультразвукової кавітації для механічного руйнування частинок та мікроорганізмів;
- термічну обробку з використанням високоенергетичних методів нагріву;
- знезараження ультрафіолетовим випромінюванням.

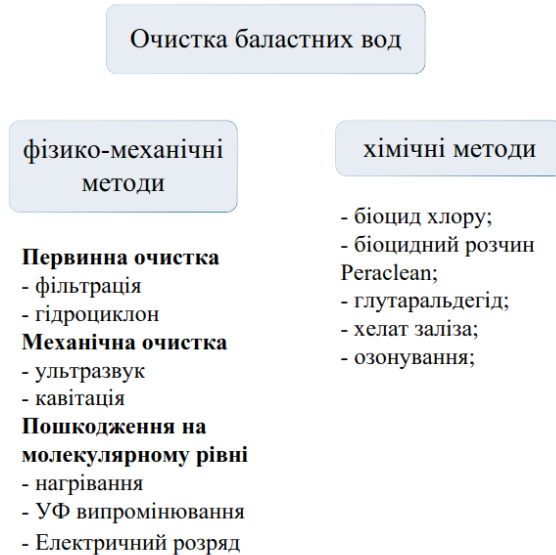


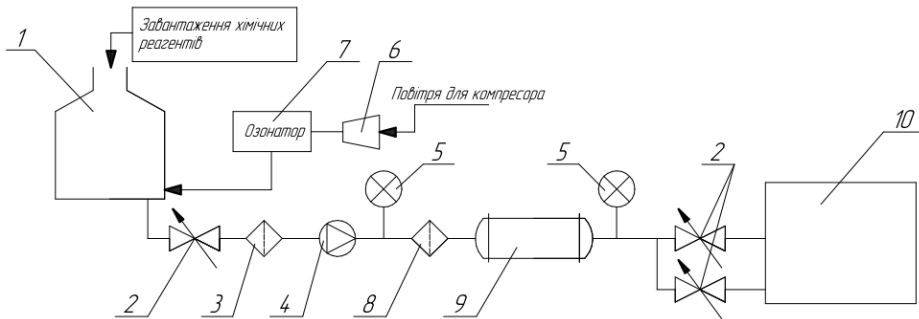
Рисунок 1. Комплекс фізико-механічних та хімічних методів обробки [6]

Науковий колектив Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія» (ДІ НУ «ОМА») в межах виконання держбюджетної науково-дослідної роботи №0124U004399 "Розробка інноваційної технології знезараження і очищення водного баласту суден згідно стандарту якості D-2 міжнародних вимог ІМО Конвенції" створив експериментальну лабораторну установку для очищення баластних вод (рис. 3). Дослідження проводилось за фінансування Міністерства освіти і науки України.

Науковими співробітниками ДІ НУ «ОМА» розроблено інтегроване технічне рішення – багатофункціональну систему управління водним баластом (СУБВ) для великотоннажних морських суден. Система повністю відповідає міжнародним нормативам стандарту D-2 Конвенції ІМО щодо якості баластних вод. Інноваційність запропонованого рішення полягає у поетапному застосуванні трьох типів обробки: хімічної, іонізаційної та механічної.

Процес очистки та дезінфекції баластних вод реалізується за наступною технологічною схемою, див. рис. 2. Початковим етапом є подача хімічних компонентів з дозувального пристрою до баластного танка (1). Дозувальний механізм забезпечує надходження у воду або хелатних сполук заліза (концентрація 8-9 г/дм³), або гіпохлориту натрію марки А (концентрація 0,2-0,4 г/дм³).

Після проведення хімічної обробки водне середовище з танка (1) проходить через систему фільтрації грубих частинок (3), звідки за допомогою спеціалізованого насосного обладнання (4) спрямовується до системи тонкої фільтрації (8) та подальшої ультрафіолетової дезінфекції у спеціальній камері (9). У камері УФ-обробки (9) здійснюється завершальний етап знезараження шляхом опромінення.



Установка з очищення та знезараження баластних вод, розроблена в Дунайському інституті НУ "ОМА"

- | | | |
|--|--|--|
| 1. Емність баластної води (V=0,04 м ³) | 4. Насос (Q max 60 л/м) | 7. Генератор озону |
| 2. Кран запірний (DN 15 1/2") | 5. Манометр (0-6 кгс/см ²) | 8. Фільтр тонкого очищення (1 мікрон) |
| 3. Фільтр грубого очищення (150 мікрон) | 6. Компресор повітряний | 9. Камера (реактор) ультрафіолетового випромінювання |
| | | 10. Емність очищеної води (V=0,04 м ³) |

Рисунок 2. Технологічна схема процесу знезараження і очищення водного баласту суден

Після потрібної обробки (хімічної, фільтраційної та ультрафіолетової) очищена баластна вода акумулюється у спеціальному резервуарі (10). Відповідно до розробленої методики, обробка води передбачає використання гіпохлориту натрію (0,2-0,4 г/дм³) або хелату заліза (8-9 г/дм³) з подальшою озонацією (продуктивність – 5 грамів щогодини). Завершальними етапами є послідовна фільтрація через систему грубого очищення, автоматичний фільтр тонкого очищення та фінальна обробка ультрафіолетовим випромінюванням.

Розроблена система використовує комплексний підхід до знезараження, що включає три основні процеси:

1. Хімічна обробка здійснюється комбінацією гіпохлориту натрію та хелату заліза.

2. Іонізаційний етап реалізується через інноваційну конструкцію системи ультрафіолетового опромінення та іонізації. Ключовою перевагою є оптимізована геометрія розташування УФ-ламп – їх паралельне розміщення відносно напрямку руху водного потоку.

3. Механічне очищення забезпечується двоступеневою фільтрацією: через вуглецеві вставки та механічний фільтр.

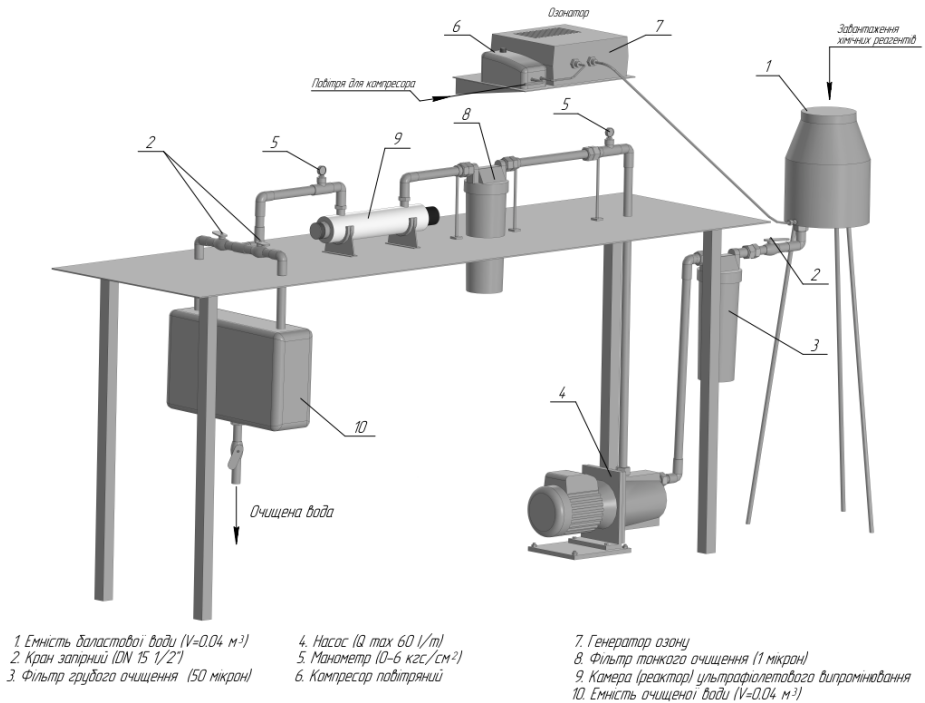


Рисунок 3. Просторова візуалізація лабораторного прототипу системи очищення баластних вод ДІНУОМА

Багатоетапність запропонованої СУБВ вимагає ретельного контролю та оптимізації численних параметрів процесу, включаючи:

- фізичні характеристики (швидкість потоку, температурний режим);
- тривалість повного циклу очищення;
- кількісні показники та розмірний розподіл інвазивних організмів у баластній воді.

Результати досліджень. Аналіз вихідного складу баластної води показав наявність:

- життєздатних мікроорганізмів розміром 10-50 мкм за мінімальним виміром у концентрації 40 особин на 1 см³;
- індикаторних мікроорганізмів, що є референтними для оцінки санітарно-епідеміологічної безпеки, у таких кількісних показниках:
 1. *Vibrio cholerae* (токсигенні штами серогруп O₁ та O₁₃₉) – 4 КУО/100 см³ або 4 КУО на грам вологої маси зоопланктонних проб.
 2. *Escherichia coli* – виявлено 400 КУО/100 см³.
 3. *Enterococcus spp.* – зафіксовано 400 КУО/100 см³.

Аналіз баластної води після проведення очистки за запропонованою технологією та з використанням розробленої установки продемонстрував наступні кількісні показники:

- концентрація життєздатних організмів діапазону 10-50 мкм за мінімальним виміром становила 10 особин на см³;
- рівень індикаторних мікроорганізмів, що слугують маркерами санітарно-епідеміологічної безпеки, характеризувався такими значеннями:

- токсигенні штами *Vibrio cholerae* (серогрупи O₁ та O₁₃₉) – зафіксовано менше 1 КУО/100 см³, аналогічно менше 1 КУО на грам вологої маси зоопланктонних зразків;
- показники *Escherichia coli* не перевищували 250 КУО/100 см³;
- вміст представників *Enterococcus spp.* становив менше 100 КУО/100 см³ (що відображає зниження загальної кількості кишкових ентерококів на 30%).

Документальну фіксацію експериментальних даних здійснено у протоколі досліджень. Експериментальні випробування системи очищення та дезінфекції проводились з використанням водних зразків, відібраних з акваторій Мармурового та Середземного морів. Проведений компаративний аналіз мікробіологічних показників до та після застосування розробленого лабораторного комплексу підтвердив його високу ефективність у процесах знезараження та очищення баластних вод.

Також в межах розробки лабораторного прототипу установки знезараження та очищення морської баластної води в ДІ НУ "ОМА" пропонується створення інтегрованої системи автоматизації. Основним елементом системи управління виступатиме спеціалізований щит автоматики, що забезпечуватиме контроль та керування всіма технологічними процесами установки.

Система автоматизації передбачає управління наступними електротехнічними компонентами: циркуляційний насос, система ультрафіолетового знезараження, система аерації та озонування.

Щит автоматики забезпечить узгоджену роботу всіх компонентів установки, контроль їх технічного стану та захист від аварійних режимів експлуатації, див. рис. 4.

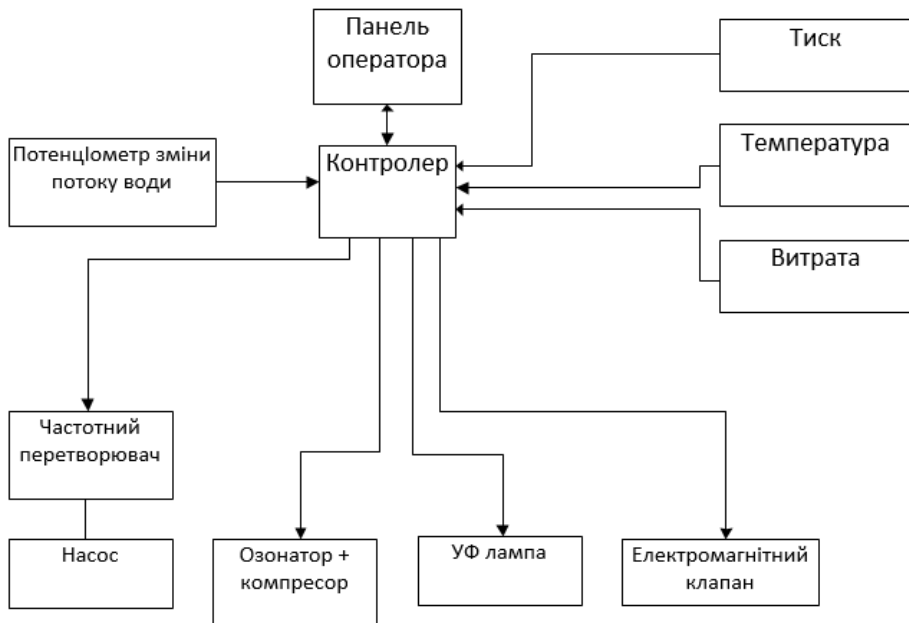


Рисунок 4. Структурна схема системи автоматизації експериментальної установки очищення баластних вод

Система автоматизації забезпечує реалізацію наступних функціональних можливостей:

1. Регулювання витрати води:

- плавне регулювання потоку через УФ-камеру в діапазоні 0-100%;
- застосування частотного перетворювача для управління насосом;
- моніторинг тиску води за допомогою датчика з аналоговим виходом 4-20 мА;
- дистанційне керування через виносний потенціометр.

2. Контроль озонування:

- програмоване налаштування тривалості обробки (від 1 хв до 1 год);
- синхронізоване управління озонатором та компресором;
- гнучке програмування режимів обробки.

3. Управління УФ-зnezараженням:

- режим промивання системи (без активації УФ-лампи);
- режим зnezараження (з активованою УФ-лампюю);
- програмований вибір режиму роботи.

4. Система моніторингу та візуалізації:

- індикація стану УФ-лампи;
- контроль процесу озонування;
- відображення тиску в системі;
- моніторинг витрати води;
- контроль температурного режиму;
- фіксація часу та дати обробки;
- ідентифікація точки відбору проб.

5. Програмування режимів очищення:

- налаштування тривалості озонування;
- встановлення цільових показників витрати води;
- збереження програм обробки.

6. Автоматизація фільтрації:

- керування електромагнітним клапаном саморозвантажувального фільтра;
- програмування циклів промивки.

Система передбачає можливість розширення функціоналу та інтеграції додаткових контрольно-вимірювальних приладів.

Для успішної реалізації проекту формується міжнародна експертна команда, до якої залучені провідні турецькі науковці, експерти Міжнародної морської організації (ІМО), фахівці сучасної лабораторної бази.

Висновок

Підсумовуючи результати дослідження, варто зазначити наступне. Для впровадження систем управління баластними водами необхідне отримання сертифікації від уповноважених національних органів згідно з процедурами, встановленими ІМО. Верифікація очисних систем передбачає комплексні випробування як в берегових умовах, так і в реальних суднових умовах для підтвердження їх відповідності нормативним показникам ефективності.

Сучасні технологічні рішення базуються на різних методах обробки, включаючи фільтрацію, ультрафіолетове опромінення та електрохлорування.

Проте існуючі системи мають певні обмеження, серед яких:

- значне енергоспоживання;
- зниження ефективності при підвищеній мутності води;
- погіршення УФ-проникності за наявності високих концентрацій розчинених органічних сполук.

Аналітичне порівняння рівнів мікробіологічного забруднення у вихідних та оброблених пробах засвідчило ефективність функціонування створеної лабораторної установки очищення та знезараження баластних вод.

Створена науковцями Дунайського інституту технологія очищення баластних вод наразі перебуває на етапі проходження процедур типового схвалення та сертифікаційних випробувань згідно з чинними нормативними вимогами.

Подяки. НДР №0124U004399 виконувалась за рахунок фінансування МОН в рамках міжнародного науково-технологічного білатерального співробітництва відповідно до Протоколу 7-го засідання українсько-турецького Спільного Комітету з науково-технологічного співробітництва.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Tsolaki, E., & Diamadopoulos, E. (2009). Technologies for ballast water treatment: A review. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 85(1), 19–32. <https://doi.org/10.1002/jctb.2276>
2. International Maritime Organization. *International Maritime Organization (IMO)*. <https://www.imo.org/> (Accessed October 1, 2024).
3. Verkhovna Rada of Ukraine. (2004). *International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments, 2004*. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_050#Text (Accessed August 10, 2024).
4. International Maritime Organization. (2016). *Resolution MEPC.279(70). Guidelines for approval of ballast water management systems (G8), 2016. Annex 5 (42 pages)*. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.279\(70\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.279(70).pdf) (Accessed October 12, 2024).
5. Lakshmi, E., Priya, M., & Achari, V. S. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean & Coastal Management*, 199, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296>
6. Bailey, S. A., Brydges, T., Casas-Monroy, O., Kydd, J., Linley, R. D., Rozon, R. M., & Darling, J. A. (2022). First evaluation of ballast water management systems on operational ships for minimizing introductions of nonindigenous zooplankton. *Marine Pollution Bulletin*, 182, 113947. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113947>
7. David, M., Gollasch, S. (2015). Ballast Water Management Systems for Vessels. *Global Maritime Transport and Ballast Water Management. Invading Nature - Springer Series in Invasion Ecology*, vol 8. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9367-4_6
8. Liu, H. (2023). Study on Ship Ballast Water Treatment Methods. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 72, 783-787. <https://doi.org/10.54097/kyy8mm53>
9. Lakshmi, E., Priya, M., & Achari, V. S. (2021). An overview on the treatment of ballast water in ships. *Ocean; Coastal Management*, 199, 105296. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105296>
10. Yilmaz, M. & Bilgin Güney, C. (2023). Evaluation of ballast water treatment systems from the perspective of expert seafarers' ship experiences. *Brodogradnja*, 74 (4), 129-154. <https://doi.org/10.21278/brod74407>

11. Sun, Y., Zhao, Y., Sheng, S., Wang, Y., & Zhou, H. (2021). Experimental study on photocatalytic treatment of alien organisms in ship ballast water by F/CE–tio2. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 102(6), 1429–1436. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00766-9>
12. Özdemir, Ü. (2022). A quantitative approach to the development of ballast water treatment systems in ships. *Ships and Offshore Structures*, 18(6), 867–874. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2077544>
13. Outinen, O., Bailey, S. A., Casas-Monroy, O., Delacroix, S., Gorgula, S., Griniene, E., Kakkonen, J. E., & Srebalienė, G. (2024). Biological testing of ships' ballast water indicates challenges for the implementation of the Ballast Water Management Convention. *Frontiers in Marine Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1334286>
14. Amidi, R., & Fatemi, S. M. (2024). Investigation and evaluation of risk of pathogen transfer by Ballast Water in Shahid Rajaei Port, Hormozgan Province, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13329-z>
15. Zatoń-Sieczka, K., & Czerniejewski, P. (2024). The impact of microorganisms transported in ships' ballast water on the fish of the estuarine waters and environmental sustainability in the southern Baltic Sea. *Sustainability*, 16(12), 5229. <https://doi.org/10.3390/su16125229>
16. Effendi, I., Ghifari, M. F., Nedi, S., & Effendi, S. (2024). Electrocoagulation system for treatment of Ballast Water. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 19(2), 217–232. <https://doi.org/10.26471/cjees/2024/019/293>

Стаття надійшла до редакції 04.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 04.02.2025

The article was received 04.11.2024 and was accepted after revision 04.02.2025

Залож Віталій Іванович

к.т.н., доцент, доцент кафедри інженерних дисциплін, Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»

Адреса робоча: Україна, 68600, Одеська обл., м. Ізмаїл, вул. Фанагорійська, 9

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5213-6896> **e-mail:** zalozh@dinuoma.com.ua

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDC 665.521.004.17

Vasyl Holinko, Doctor of Technical Sciences, Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6069-0515> **e-mail:** golinkongu@gmail.com

Oleg Kuznetsov, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4038-8102> **e-mail:** oleg.kuznetsov95@gmail.com

Oleksandr Holinko, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1980-3017> **e-mail:** HolinkoAV@gmail.com

Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

IMPROVEMENT OF EXPLOSION HAZARD MONITORING SYSTEMS FOR TECHNOGENIC FACILITIES

Abstract. *The purpose of this work is to find solutions aimed at improving the explosion hazard monitoring systems of man-made facilities in the presence of a multicomponent fuel-air mixture by means of an integrated explosion hazard assessment and improving the accuracy of control equipment.*

Materials and methods. *Analytical methods for studying the process of oxidation of combustible gases and vapors on catalysts based on the classical provisions of electrical engineering, thermodynamics and catalysis, experimental studies of serial single-chamber thermocatalytic sensors of pellet type with a platinum-palladium catalyst when they operate in a multicomponent fuel-air mixture, evaluation and generalization of the results of theoretical and experimental studies were used in this work.*

Results. *The peculiarities of the oxidation process of combustible gases and vapors in thermocatalytic sensors with a non-selective platinum-palladium catalyst under changing the temperature regime of the working thermocouple were established. It has been shown that thermocatalytic sensors with a non-selective platinum-palladium catalyst under a certain temperature regime of operation allow for an unambiguous assessment of the explosiveness of such components as methane, butane, and heptane, which allows for an integrated assessment of the explosiveness of a multicomponent fuel-air mixture. For the studied sensors, this is ensured by selecting a preheating temperature of 350°C for the working thermocouple in the air.*

Scientific novelty. *The conditions under which thermocatalytic sensors with a non-selective platinum-palladium catalyst allow for an integrated unambiguous assessment of the explosive hazard of the environment, including in the presence of a multicomponent fuel-air mixture, have been established.*

Practical significance. *It consists in establishing the conditions under which it is possible to unambiguously assess the explosive properties of fuel-air mixtures, including multicomponent ones, using a single thermocatalytic sensor, which reduces the cost of explosion monitoring systems and increases the reliability of explosion control under conditions where various explosive gases and vapors of volatile combustibles can simultaneously accumulate in the air.*

Keywords: *hazard, combustible gases, fuel, monitoring systems, sensors, integrated explosion hazard assessment.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.62-73>

Introduction

Technogenic objects that use or store explosive gases and volatile combustibles pose a danger to humans and the environment. In addition, explosions of gas-air and fuel-air mixtures lead to significant material losses, destruction of buildings, structures, machinery, process equipment, equipment, etc. [1]. Reducing the risk caused by explosions of such mixtures is achieved both by preventing the possibility of such hazardous events and by developing measures aimed at reducing the severity of their consequences.

One of the main measures aimed at reducing the likelihood of explosions is automatic continuous monitoring of the content of explosive gases or vapors in places of their possible release into the air, which allows timely decisions to be made to prevent the formation of explosive mixtures and to eliminate possible sources of ignition of such mixtures [2].

With the development of information technology, systems for monitoring the safety of man-made facilities are becoming increasingly common. In this case, explosion hazard monitoring is a continuous observation of the content of explosive gases or vapors in places of their possible release into the air in order to assess the hazard, predict risks and take measures to minimize or eliminate them. Today, almost all modern monitoring systems are based on computers and information systems. In this case, monitoring systems are transformed into computer-based monitoring systems [3].

The issue of explosive hazards at man-made facilities is becoming increasingly acute nowadays, when artillery and rocket attacks on enterprises and settlements, the use of aircraft, and the fall of debris from downed air targets pose a high threat of damage to the integrity of tanks and transportation routes containing explosive gases and volatile flammable liquids. Therefore, given the significant increase in the risk of explosions and fires at man-made facilities, research aimed at preventing them is of particular importance.

Analysis of recent research and publications

The development of methods and means for monitoring the content of explosive gases and vapors of volatile combustibles is the subject of research by many scientists [4], [5]. Among the control means currently used for these purposes, the most common are those based on thermocatalytic, semiconductor and optical methods.

Coal mine explosion hazard monitoring systems mainly use thermocatalytic sensors [4]. They are characterized by a simple design, low cost, and are able to ensure stable operation of the control equipment in difficult underground operating conditions characterized by high humidity, significant air dust, the presence of uncontrolled gas components, and the possibility of significant methane overloads in case of emergency gas gassing of mine workings [5].

Semiconductor (metal oxide) sensors are also simple in design and relatively inexpensive. Their advantage is high sensitivity and long service life. However, these sensors are quite sensitive to overloads [6] and are not stable enough in time, especially when monitoring high concentrations of vapors or gases, which imposes certain restrictions on their use in monitoring systems for the explosive hazard of objects [6]. They are widely used in ventilation and air purification systems and in portable gas analyzers [7]. Semiconductor methane sensors and propane sensors are used in explosion monitoring systems.

Sensors based on the optical absorption method are the fastest, but are quite vulnerable to changes in temperature, pressure, humidity, and various gas impurities. A significant factor limiting the use of these sensors is air dustiness, smoke, and smog in the place of their installation. Known solutions aimed at reducing the impact of these factors on the operation of optical sensors [8], [9] significantly complicate both the sensors and the control means, and increase their cost. Therefore, the use of such sensors in explosion hazard monitoring systems is justified only when it is impossible to meet the necessary requirements for the response time of protective equipment when using thermocatalytic or semiconductor sensors.

Other well-known methods for monitoring explosive gases and vapors of volatile combustibles include flame ionization, photo-ionization, and chromatographic methods [10], [11]. Control devices based on these methods are quite sensitive and allow monitoring the content of maximum permissible concentrations of gases and vapors. However, such devices are quite complex and expensive, which actually excludes the possibility of their use in explosion hazard monitoring systems. Their application in monitoring systems is most often limited to environmental monitoring.

The analysis and practice of using sensors for monitoring the content of explosive gases and vapors of volatile combustibles [12] indicate that thermocatalytic and semiconductor sensors should be preferred in the development and implementation of explosion hazard monitoring systems for man-made facilities.

Currently, in Ukraine, VARTA 1 gas detectors of various modifications are used for automatic continuous monitoring of pre-explosive concentrations of combustible gases and volatile combustible vapors (except in coal mines) [12], which consist of a control unit and separate measuring devices in the amount of up to 24 (VARTA 1-03.24). Measuring devices consist of two parts: a housing with a processor board and a head with a thermocatalytic or semiconductor sensor. The method of supplying the air mixture to the sensor is diffusion. The required number of measuring devices and their combination by type is determined by the customer depending on the required number of control points and the number of explosive components. Separate measuring devices are used in the gas alarm to control the explosion hazard for monitoring the methane content DM-24, propane content DP-24 and combustible gas content DGG-24. The latter is adjusted using calibration mixtures for a specific type of combustible gases or vapors of volatile combustibles, and when monitoring the content of gasoline vapors – by hexane. The DM-24 and DP-24 measuring devices use semiconductor sensors, while the DGG-24 uses thermocatalytic sensors.

When different combustible gases and vapors of volatile combustibles, such as methane, butane, propane, gasoline vapors, diesel fuel, can enter the air at the same time, the use of this gas detector requires the installation of several measuring devices configured or responding to certain types of explosive substances. This significantly complicates the control system and increases both its initial cost and maintenance costs. In addition, the overall error of measuring the concentration of a particular component, or the alarm for this component, is significantly affected by the presence of other combustible vapors or gases, which causes its significant value. For example, at the value of the first alarm threshold in the presence of methane of 0.5% by volume, the permissible basic absolute error of the alarm for the main component is $\pm 0.25\%$ by volume, for other combustible components $\pm 0.45\%$ by volume, and due to the influence of temperature and humidity limits $\pm 0.35\%$ by volume. Obviously, with such values of methane measurement error, the alarm can

be triggered both in the absence of methane in the air and only after exceeding the second alarm threshold. The same situation is possible for the other measured components.

In view of the above, research on monitoring the explosive hazard of man-made facilities, especially in terms of improving methods and means of controlling the content of explosive gases and vapors of volatile combustibles, is a very urgent task.

The aim of the work is to find solutions that allow improving the system of monitoring the explosiveness of man-made objects by integrating the explosiveness of a multicomponent fuel-air mixture and increasing the reliability of its control equipment.

Research methods

Analytical methods of studying the oxidation of combustible gases and vapors on catalysts based on the classical provisions of electrical engineering, thermodynamics and catalysis, experimental studies of serial single-chamber thermocatalytic sensors of pellet type with a platinum-palladium catalyst when they operate in a multicomponent fuel-air mixture, evaluation and generalization of the results of theoretical and experimental studies were used in this work.

Presentation of the main material

The explosive properties of a fuel-air mixture, provided that various combustible gases and vapors of volatile combustibles may be present in the air at the same time, do not depend on the content of one single component, but are determined by their combination and the properties of each component. Provided that each component of the mixture does not affect the oxidation reaction of other components, the condition under which the mixture becomes explosive can be represented by the following expression

$$\frac{C_1}{C_{LEL1}} + \frac{C_2}{C_{LEL2}} + \dots + \frac{C_n}{C_{LELn}} \geq 1, \quad (1)$$

where C_1, C_2, C_n – is the concentration of components in the mixture, in kg/m^3 or % volume; $C_{LEL1}, C_{LEL2}, C_{LELn}$ – is the lower ignition limit (LEL) of the mixture for each individual component, respectively, in kg/m^3 or % volume.

In this case, when setting the first alarm threshold at 10% of the LEL of a multicomponent fuel-air mixture, the alarm condition can be represented as follows

$$\frac{C_1}{C_{LEL1}} + \frac{C_2}{C_{LEL2}} + \dots + \frac{C_n}{C_{LELn}} \geq 0,1. \quad (2)$$

In the presence of measuring devices that monitor the content of each individual combustible component, provided that different combustible gases and vapors of volatile combustibles (e.g. methane, butane and gasoline vapors) can simultaneously enter the air, the fact of reaching the first alarm threshold can be determined by

calculating the total current value of the ratio of the concentration of components in the mixture to their LEL. If the VARTA 1-03.24 gas detector is used in the monitoring system to control the explosive properties of a multicomponent fuel-air mixture, additional processing of information on the content of individual components or appropriate modification of the software of this gas detector is required in the monitoring system.

It should be noted that determining the alarm threshold by calculation based on the current value of the content of individual components is far from an optimal solution. The reason for this is the presence of significant errors in measuring the concentration of each individual component, primarily those caused by the presence of other combustible vapors or gases and characterized by unidirectional action. As a rule, when a measuring device is adjusted to a specific combustible component, the presence of other combustible components leads to an overestimation of the readings of the measuring devices (error with a + sign). Obviously, this increases the likelihood of false alarm activation. In addition, with this approach to determining the threshold, it is necessary to have separate measuring devices to determine the concentration of each component, which greatly complicates and increases both the initial cost of the system and the cost of its maintenance.

Another solution is to use sensors that directly provide an integrated assessment of the explosiveness of a multicomponent mixture. Among all the control methods considered, the only method that can be used to create such sensors is thermocatalytic, since regardless of the type of combustible component, it is oxidized on a catalytically active thermocouple, which is accompanied by heat generation, an increase in its temperature and resistance.

Today, the most widely used thermocatalytic sensors consist of two sensitive thermoelements – a working (active) and a comparative one. The thermoelements have the same geometric dimensions and electrical parameters. They are placed in a reaction chamber made of porous ceramics or metal-ceramic an internal diameter of 5-6 mm [4]. The analyzed mixture enters the reaction chamber mainly due to its diffusion caused by the presence of a gas concentration gradient. The sensing elements of modern sensors look like a miniature ball made of aluminum γ -oxide, inside which there is a platinum wire spiral that simultaneously serves as a heating element and a resistance thermometer. The surface of the catalytically active element is coated with a platinum-palladium catalyst. The working and compensation elements are most often included in one arm of a bridge measuring circuit [4]. Heat from the elements is mainly removed by thermal conduction, convective heat transfer and radiation.

At low concentrations of combustible gases or vapours and an excess of oxygen in the controlled gas mixture, it can be assumed that each combustible component diffuses independently to the surface of the fuel element at a rate determined by its diffusion coefficient. The thermal effect of each fuel component is also independent, and the total heat release on the fuel element from the oxidation reaction of combustible components P_{Σ} is equal to the sum of the thermal effects of all components

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i C_{rki} \gamma_{ei} , \quad (3)$$

where Q_i – is the lower calorific value of the i -th fuel component, J/kg; C_{rki} – is the concentration of the i -th component in the reaction chamber, kg/m³; γ_{ei} – is an effective diffusion conductivity of the fuel element relative to the i -th component, m³/s.

In general, the effective diffusion conductivity of the element is determined by its geometric parameters, the oxidation efficiency of the fuel component on the element surface, and the parameters of mass transfer to its surface [4].

$$\gamma_e = 10^{-2} k_e \beta_e F_e, \quad (4)$$

where k_e – is an oxidation efficiency of the fuel component; β_e – is the mass transfer coefficient, m/s; F_e – is the element surface area, m².

The oxidation reaction of combustible gases and vapors on a platinum-palladium catalyst can occur in the kinetic and diffusion domains [4].

The rate of the oxidation reaction in the kinetic region depends on the type and temperature of the catalyst, as well as the concentration of the reacting components. When controlling pre-explosive gas or vapor concentrations in the range up to 0.2 LEL, when the oxygen concentration in the mixture is significantly higher than the concentration of combustible components, it can be assumed that the oxidation reaction rate in the kinetic region is determined by the content of combustible components. In the case of methane oxidation over a platinum-palladium catalyst, this region is characteristic at a temperature of the thermocouple up to 360 °C. Oxidation is accompanied by simultaneous adsorption of oxygen and combustible components by the catalyst surface. At higher catalyst temperatures, the chemical reaction rate increases to the point where a zero methane concentration and some oxygen deficiency are formed on the active surface of the thermocouple. The reaction rate and, consequently, the amount of heat generated in this case is determined by the rate of methane diffusion to the surface of the thermoelement. For a platinum-palladium catalyst, the diffusion region occurs at temperatures above 360 °C during methane oxidation [4]. For other hydrocarbons (propane, butane, hexane, etc.) and volatile fuel components, due to their lower self-ignition temperatures, the diffusion region occurs at much lower temperatures.

The mass transfer coefficient depends on the diffusion properties of the fuel component and can be generally represented as [4].

$$\beta_i = D_i / \delta_D, \quad (5)$$

where D_i – is the molecular diffusion coefficient of the i -th fuel component in air, m²/s; δ_D – is the thickness of the diffusion boundary layer, m.

The analysis of the above expressions shows that at a constant gas and element temperature, the power released on the working element due to the oxidation of the i -th fuel component is determined by the properties of the catalyst, the design of the element and is proportional to the product of its concentration in the chamber, the lower heating value of the component and its diffusion coefficient. In the ideal case, when the oxidation reaction of all components occurs in the diffusion region, the oxidation efficiency of fuel components included in expression (4) is $k_e = 1$ and expression (1) can be represented as

$$P_{\Sigma} = K_s \sum_{i=1}^n Q_i C_{rki} D_i, \quad (6)$$

where K_s – is the coefficient that takes into account the design features of the sensor and the properties of the catalyst, m.

In fact, when using serial thermocatalytic sensors with a platinum-palladium catalyst, it is impossible and impractical to realize the temperature regime of thermoelements at which the oxidation reaction of all components occurs in the diffusion region. The reason for this is that at temperatures above 360 °C, as a prerequisite for the methane oxidation reaction to occur in the diffusion region, higher methane homologues and many other fuel components characterized by a significantly lower self-ignition temperature are oxidized not only on the catalytically active element but also on the comparison element. In addition, when a thermocatalytic sensor operates in a mode that ensures the oxidation of all components of the mixture in the diffusion region, it is impossible to ensure the unambiguousness of the alarm, for example, at a content of 0.1 LEL of each individual component. This is due to the fact that the sensitivity of the sensor to the components of the mixture is not proportional to their NMW. Table 1 shows information about the properties of combustible gases and gasoline components, as well as the relative sensitivity (for hexane) of the thermocatalytic sensor when it operates in the diffusion region and the value of the first alarm threshold for different components when the sensor is tuned for hexane.

Table 1. Characteristics of combustible gases and components of gasoline vapors and the relative sensitivity of the thermocatalytic sensor to them (for hexane)

The name of a gas or fuel component	Diffusion coefficient, $D \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$	Specific heat of combustion, MJ/kg	Molecular weight, a.o.m.	LEL		Relative sensitivity		1st threshold, %vol.		k_e
				%vol.	kg/m ³	per unit of mass	by %vol.	calculation	necessary	
Methane	19,6	55,7	16	5,0	0,036	3,3	0,59	0,20	0,50	0,4
Ethane	11,6	52,1	30	3,2	0,043	1,9	0,63	0,19	0,32	0,58
Propane	9,4	46,0	44	2,2	0,045	1,3	0,65	0,17	0,22	0,71
Butane	8,2	45,7	58	1,8	0,046	1,15	0,81	0,15	0,18	0,83
Pentane	7,29	45,4	72	1,4	0,047	1,02	0,86	0,14	0,14	1
Hexane	7,21	45,1	86	1,2	0,048	1,00	1,0	0,12	0,12	1
Heptane	6,65	44,9	100	1,0	0,049	0,92	1,07	0,11	0,10	1,02
Octane	6,10	44,8	114	0,96	0,051	0,84	1,23	0,097	0,096	1,05
Decane	5,60	44,6	142	0,78	0,052	0,77	1,27	0,095	0,078	1,20
Benzene	8,95	40,6	78	1,4	0,050	1,12	0,99	0,12	0,14	0,85
Ethanol	11,9	29,0	46	3,1	0,064	1,06	0,54	0,22	0,31	0,71
Hydrogen	66	287	2	4	0,004	58,2	1,3	0,92	0,4	2,27

These data show that in this mode of operation, when the sensor is set to 0.1 NMW for a particular component, for example, hexane, in the presence of methane, the first threshold alarm will be triggered not when it reaches 0.5% vol. but when it reaches 0.2% vol. which is 0.04 NMW. Accordingly, for propane – 0.06 LEL, butane – 0.08 LEL. Thus, when all combustible components are oxidized in the diffusion region, it is impossible to ensure the unambiguousness of the alarm when using a single sensor, both for individual components and for a multi-component fuel-air mixture.

Consider the possibility of unambiguously assessing the explosive properties of a multicomponent mixture for the case when methane, butane and hexane can simultaneously accumulate in the air, according to which it is customary to set up an alarm in the presence of gasoline vapor, by changing the temperature regime of the thermocatalytic sensor. When selecting the temperature of preheating of the thermoelements at which there will be no oxidation of combustible components on the comparison element, the oxidation reaction of some components characterized by a high auto-ignition temperature will occur in the kinetic region. For these components, the oxidation efficiency coefficient can be significantly less than unity. In this case, expression (6) must be supplemented with the oxidation efficiency coefficient and it takes the following form

$$P_{\Sigma} = K_s \sum_{i=1}^n k_{ei} Q_i C_{rki} D_i, \quad (7)$$

From the obtained expression (7), it can be seen that in this case, the heat generation at the working thermocouple depends on its content, the efficiency of its oxidation, and the product of the lower heating value of the component and its diffusion coefficient.

Based on expression (7) and the data of Table 1, the theoretical value k_e was calculated at which the same value of the 1st threshold of alarm operation for combustible components is ensured at the level of 0.1 LEL (Table 1). Based on the above data for a three-component mixture (methane, butane, and hexane), the sensitivity of the detector to methane and butane should be reduced (relative to the sensitivity when the reaction occurs in the diffusion region), respectively, by 2.5 and 1.2 times.

To evaluate the possibility of performing an integrated assessment of the explosive properties of a multicomponent mixture by changing the temperature regime of the thermocatalytic sensor for the case when methane, butane, and hexane can simultaneously accumulate in the air, we observed the change in the output signal of serial thermocatalytic sensors used in the AT-3-1 and AT-3-3 mine methane analyzers when their temperature regime changes. For the study, 10 sensors with a non-selective platinum-palladium catalyst were used. The sensors were connected to the measuring bridge and installed in a small-sized chamber, which was first filled with clean air (to set the bridge zero), and then with certified gas mixtures with pre-explosive concentrations of components. The measuring bridge was powered by a stable current source, the value of which consistently varied from 170 to 230 mA, with a gradation of 5 mA. After each increase in current, with a time delay of 10 s (sufficient for the end of transients), the output voltage of the measuring bridge was read. For all sensors (with a slight variation in absolute values), the dependence of

the output voltage of the sensors on the current through the thermoelements for different combustible components was identical. A characteristic view of the dependence of the output voltage of the sensors on the value of the current through the thermoelements when pre-explosive concentrations of combustibles are supplied to the chamber is shown in Fig. 1.

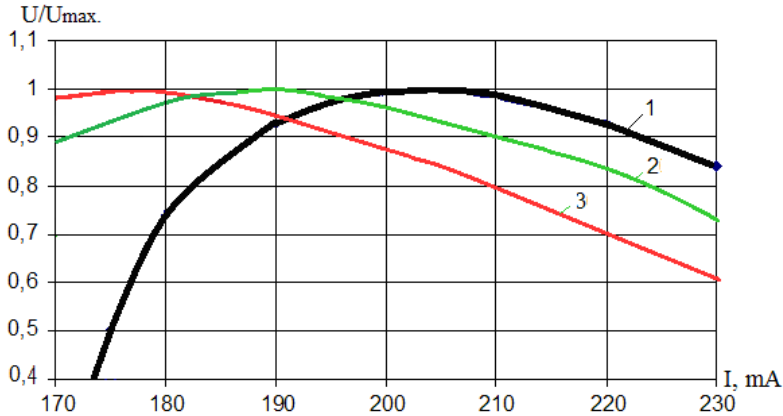


Fig. 1. Dependence of the relative value of the output voltage of the sensors on the current through the thermoelements when pre-explosive concentrations of combustibles are supplied to the chamber: 1 – methane; 2 – butane; 3 – hexane

The relative value of the output voltage of the sensors at different values of the current through the thermoelements $U/U^{\max}$, in this case is actually the coefficient of oxidation efficiency of the fuel component. The analysis of the obtained dependencies shows that at a current through the thermoelements of 175 mA, the value of the oxidation efficiency coefficient of fuel components is: for methane – 0.42, butane – 0.92, and hexane – 1.0. These values are close to the calculated values of the coefficient given in Table 1, which ensure the unambiguity of the 1st threshold of alarm operation for combustible components at the level of 0.1 LEL.

The relationship between the temperature of a platinum resistor and its resistance R_e is determined by the known expression

$$R_e = R_{0e}(1 + \beta t_e), \quad (8)$$

where: R_{0e} – is the resistance of the thermoelement at 0 °C, Ohm; β – is the temperature coefficient of resistance of platinum, 1/°C; t_e – is the temperature of the element, °C.

At a current through the thermocouple of 175 mA, the temperature of the working thermocouple in the air, calculated on the basis of expression (8), was about 350 °C. Thus, under this temperature regime of operation of the studied thermocatalytic sensors with a platinum-palladium catalyst, an unambiguous alarm is practically ensured when the established explosive hazard indicators, for example, 0.1 LEL, are reached, both in the presence of a single component and when they are simultaneously released into the air. It is characteristic that the maximum relative value of the output voltage of the sensors from the current through the thermoelements when pre-explosive concentrations of combustibles are supplied to

the chamber is uniquely related to their self-ignition temperature. The lower this temperature is, and therefore the lower the activation energy of the oxidation reaction of the combustible component on the catalyst, the lower the value of the heating of the thermocouple, the higher the maximum is. Taking this into account, by selecting the temperature regime of the sensor, almost all combustible components listed in Table 1 provide unambiguous alarm operation when using a single thermocatalytic sensor. The only exception is hydrogen, due to its ability to create explosive mixtures at a content (by weight) an order of magnitude lower than that of other components.

It should be noted that the temperature operating conditions of the sensor, which ensure unambiguous protection operation, are defined for a specific type of thermocatalytic sensor. For other types of sensors, it may be slightly different. This is due to the fact that the flow of gas or fuel vapors to the working thermocouple of the sensor depends not only on its effective diffusion conductivity in relation to the combustible component, but also on the diffusion conductivity of the filter element. In the studied sensors, at a preheating temperature of the sensor element of about 400°C, the effective diffusion conductivity of the sensor element for methane is approximately equal to the diffusion conductivity of the filter element. With other conductivity ratios, the dependence of the relative value of the output voltage of the sensors on the current through the thermoelements may shift slightly. Therefore, when developing gas analyzers for an integrated assessment of the explosiveness of a multicomponent fuel-air mixture, additional research is needed. In practice, when using modern microcontrollers, the selection of the sensor's operating mode can be carried out automatically when it is set up for two test mixtures, such as methane-air and hexane-air.

In addition, it should be noted that if the specified temperature operating mode of the sensor is selected, the oxidation of such components as methane and ethane will occur in the kinetic region, and propane and butane in the transition region. In this case, a change in the temperature mode of operation of the thermoelements, which may be due to instability of the power supply parameters or changes in the temperature and composition of the air, can lead to significant measurement errors. Therefore, to realize such a mode of operation of the sensor, it is necessary to maintain either a constant temperature of the environment where the sensor is installed or to change the power supply parameters of the sensor depending on the temperature of the environment. All this requires further research in this area.

Conclusion

The research has shown that thermocatalytic sensors with a non-selective platinum-palladium catalyst under a certain temperature regime allow for an integrated assessment of the explosive hazard of a multicomponent fuel-air mixture. For the studied sensors, this is ensured by choosing a preheating temperature of the working thermocouple in air of 350 °C. Under such conditions, the reaction of catalytic oxidation of such combustible components of the mixture as methane and ethane, propane and butane occurs in the kinetic and transient region, so a change in the temperature regime of the thermocouple can lead to significant measurement errors. Therefore, further research in this area is to substantiate solutions to minimize the errors in determining the NMR under the condition of an integrated assessment of the explosiveness of a multicomponent fuel-air mixture by a thermocatalytic sensor.

REFERENCES

1. Stoetskyi, V.F., Dranyshnikov, L.V., Esypenko, A.D., Zhartovsky, V.M., Naivert, O.V. (2006). Man-made safety management of high-risk facilities: monograph. Kyiv, Ukraina: Aston. 410 [In Ukrainian].
2. Holinko, O., Yuldasheva, N., Zhartay, Z., Mirzoieva, T., Petrychenko, O., Hulevets, V. (2023). Methodology of creation and development of information systems for technological safety of mining facilities. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, №6, 127-133. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-6/127> [In Ukrainian].
3. Golinko, V., Golinko, O. (2023). Theoretical and methodological principles of computer monitoring of explosion protection systems. *Naukovi pratsi DonNTU. Seriya: «Informatyka, kibernetyka ta obchyslyval'na tekhnika»*, №2-37, 34-41. Retrieved from <https://iktv.donntu.edu.ua/№2-372023/> [In Ukrainian].
4. Golinko, V., Kotlyarov, A. (2010). Control of explosive environment in mining and equipment of coal mines. Monograph. Dnipropetrovsk Ukraina: "Lyra" publishing house, 368 s. ISBN 978-966-383-269-2 [In Ukrainian].
5. Golinko, V.I., Belonozhko, A.V., Belonozhko, V.V. (2014). Control of the explosion hazard of gas mixtures during emergency gas contamination of mine workings: monograph. *Natsional'nyy gornyy universitet. Dnepropetrovsk: NGU*, 209 [In Ukrainian].
6. Rachid Laref, Diaa Ahmadou, Etienne Losson, Maryam Siadat (2017). Orthogonal Signal Correction to Improve Stability Regression Model in Gas Sensor Systems. *Journal of Sensors*, Volume 2017. Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/js/2017/9851406/>
7. Yuri Koval (2012). New semiconductor MEMS gas sensors from FIGARO ENGINEERING. *CHIP NEWS Ukraine*, 3(113), 52-55. Retrieved from <https://storage.sea.com.ua/files/links/mems-daticiki-gaza-figarocnno320121504002845.pdf>
8. Vovna, A., Zori, A. (2013). High-speed meter of methane concentration in the mine atmosphere of coal mines. *Visn. Kremenchutsk. nat. un-tu im. Mikheil Ostrogradsky*, 6 (83), 114–119. Retrieved from [https://visnikkrmu.kdu.edu.ua/statiti/2013-6\(83\)/114.pdf](https://visnikkrmu.kdu.edu.ua/statiti/2013-6(83)/114.pdf) [In Ukrainian].
9. Vovna, O., Zori, A., Akhmedov, R. (2017). Increasing the accuracy of the optoelectronic methane concentration meter of coal mines. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. «Elektroenerhetyka ta peretvoryval'na tekhnika»*, 4 (1226), 19–24. Retrieved from <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b14d9ec7-0fc8-4ff9-974d-26da69298c11/content> [In Ukrainian].
10. Vovna, O.V., Zori, A.A., Khlamov, M.G. (2010). Method of compensating for dynamic error of infrared methane concentration meter for coal mines. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI». Zbirnyk naukovykh prats'. «Elektroenerhetyka ta peretvoryval'na tekhnika»*, 2, 65–70. Kharkiv. NTU "KhPI". Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/162886053.pdf> [In Ukrainian].
11. Ishchenko, V.A., Petruk, V.G. (2010). Highly sensitive means of controlling small concentrations of gases: monograph. Vinnytsia: VNTU. 138 s. Retrieved from <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/> [in Ukrainian].
12. Gas detector "VARTA 1-03.24". Retrieved from <https://temio.com.ua/product-category/varta-1-promyslovi/>

The article was received 15.11.2024 and was accepted after revision 11.02.2025

В.І. Голінько, О.К. Кузнецов, О.В. Голінько

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ ТЕХНОГЕННИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. Метою роботи є пошук рішень, спрямованих на вдосконалення систем моніторингу вибухонебезпечності техногенних об'єктів за наявності багатокomпонентної паливоповітряної суміші шляхом інтегральної оцінки вибухонебезпечності та підвищення точності засобів контролю.

Методи дослідження. В роботі застосовані аналітичні методи досліджень процесу окиснення горючих газів та парів на каталізаторах, що базуються на класичних положеннях електротехніки, термодинаміки та каталізу, експериментальні дослідження серійних однокамерних термокаталітичних датчиків пелістерного типу з платино-паладієвим каталізатором при їх роботі в багатокомпонентній паливоповітряній суміші, оцінка та узагальнення результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

Результати. Встановлені особливості протікання процесу окиснення горючих газів та парів в термокаталітичних датчиках з неселективним платино-паладієвим каталізатором при зміні температурного режиму роботи робочого термоелементу. Показано, що термокаталітичні датчики з неселективним платино-паладієвим каталізатором за певного температурного режиму роботи дозволяють здійснювати однозначну оцінку вибухонебезпечності за такими компонентами, як метан, бутан та гептан, що дозволяє здійснювати інтегральну оцінку вибухонебезпечності багатокомпонентної паливоповітряної суміші. Для досліджених датчиків це забезпечується при виборі температури попереднього розігріву температури робочого термоелемента в повітрі 350 °C.

Наукова новизна. Встановлені умови, за яких термокаталітичні датчики з неселективним платино-паладієвим каталізатором дозволяють здійснювати інтегральну однозначну оцінку вибухонебезпечності середовища, у тому числі за наявності багатокомпонентної паливоповітряної суміші.

Практична значимість. Полягає у встановленні умов, за яких можливе здійснення однозначної оцінки вибухових властивостей паливоповітряних сумішей, у тому числі багатокомпонентних, при використанні одного термокаталітичного датчика, що дозволяє зменшити витрати на системи моніторингу вибухонебезпечності та підвищити надійність контролю вибухонебезпечності за умов, коли в повітрі можуть одночасно накопичуватись різні вибухонебезпечні гази та пари летких горючих речовин.

Ключові слова: небезпека, горючі гази, паливо, системи моніторингу, датчики, інтегральна оцінка вибухонебезпечності.

Стаття надійшла до редакції 15.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 11.02.2025

Голінько Василь Іванович

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: 49005 м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6069-0515> **e-mail:** golinkongu@gmail.com

Кузнецов Олег Костянтинович

аспірант кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: 49005 м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4038-8102> **e-mail:** oleg.kuznetsov95@gmail.com

Голінько Олександр Васильович

аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Адреса робоча: 49005 м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1980-3017> **e-mail:** HolinkoAV@gmail.com

UDK (616-092.11+616-036.12):69

Yurii Tsiuriupa, Senior Lecturer, PhD student of the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Safety
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-2654-0270> **e-mail:** jurij.zurupa@gmail.com

Viktoriiia Sakhnovska, PhD student of the Department of Labor Protection and Environment
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2489-7276> **e-mail:** vsahnovskaya@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

SICK BUILDING SYNDROME: UNCERTAINTY OF CAUSES AND CHALLENGES OF CLASSIFICATION

Abstract. *The article addresses the problem of developing a universal classification of negative factors associated with Sick Building Syndrome (SBS), taking into account current technological, climatic, and epidemiological challenges. A critical analysis of existing approaches is provided, including classifications proposed by the WHO, CPSC, and various researchers who identify physical, chemical, biological, psychophysiological, and other groups of pollutants. It is shown that none of the existing systems fully cover the entire spectrum of external and internal factors – particularly neglecting climate influences, epidemiological threats, socio-psychological conditions, and new “video-ecological” parameters related to visual homogeneity and aggressiveness of the built environment.*

Based on an interdisciplinary approach, an extended classification is proposed, dividing SBS factors into two broad groups: external (climatic, ecological, radiological, video-ecological) and internal (microclimate parameters, physical, technical, radiological, psychological, and biochemical factors). Special attention is given to video ecology – a field that examines the impact of homogeneous and aggressive visual environments on the oculomotor system and the psycho-emotional state of individuals.

The role of natural biotechnical filters – indoor plants – is also considered. These plants regulate humidity, absorb VOCs and CO₂, emit phytoncides, suppress pathogens, reduce noise, and enhance psycho-emotional well-being. Recommendations are provided for integrating plants into biophilic design as a cost-effective means of improving indoor environmental quality and preventing SBS.

The proposed classification aims to improve risk assessment, the development of preventive measures, and building operation standards to safeguard the health of residents and workers in the context of urbanization, energy efficiency, and global climate change.

Keywords: Sick Building Syndrome (SBS); video ecology; classification of SBS risk factors; natural biotechnical filters.

Ю.В. Цюрюпа, В.М. Сахновська

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

СИНДРОМ ХВОРОЇ БУДІВЛІ: НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ЧИННИКІВ І ВИКЛИКИ КЛАСИФІКАЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто проблему формування універсальної класифікації негативних факторів синдрому хворої будівлі (СХБ) з урахуванням сучасних технологічних, кліматичних та епідеміологічних викликів. Проведено критичний аналіз існуючих підходів, зокрема класифікацій, запропонованих ВООЗ, CPSC та низкою дослідників, які виділяють фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні та інші групи забруднювачів. Показано, що жодна з відомих систем не охоплює весь спектр зовнішніх і внутрішніх чинників, серед яких окремо не виокремлені кліматичні впливи, епідеміологічні загрози, соціально-психологічні умови та нові «відеоекологічні» параметри, пов'язані з візуальною гомогенністю та агресивністю штучного середовища.

На основі міждисциплінарного підходу запропоновано розширену класифікацію, що поділяє фактори СХБ на дві великі групи: зовнішні (кліматичні, екологічні, радіаційні, відеоекологічні) та внутрішні (параметри мікроклімату, фізичні, технічні, радіаційні, психологічні, біохімічні). Особливу увагу приділено відеоекології – напряду, що аналізує вплив гомогенних та агресивних візуальних полів на окоруховий апарат і психоемоційний стан людини.

Також розглянуто роль природних біотехнічних фільтрів – кімнатних рослин, які одночасно регулюють вологість, поглинають леткі органічні сполуки (ЛОС) та CO₂, виділяють фітонциди, пригнічують патогени, знижують шум та покращують психоемоційний комфорт. Наведено рекомендації щодо інтеграції рослин у біофільний дизайн як економічно доступного засобу підвищення якості внутрішнього середовища та профілактики СХБ.

Запропонована класифікація спрямована на підвищення ефективності оцінки ризиків, розробки превентивних заходів і стандартів експлуатації будівель для забезпечення здоров'я мешканців і працівників у сучасних умовах урбанізації, енергетичної ефективності та глобальних кліматичних змін.

Ключові слова: «синдром хворої будівлі» (СХБ); відеоекологія; класифікація небезпечних факторів СХБ; гігієна праці; здоров'я людей; природні біотехнічні фільтри.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.74-83>

Вступ

У сучасних умовах значна частина життєвого циклу людини, що становить в середньому 80-90%, проходить у закритих просторах різного функціонального призначення, включаючи освітні заклади, житлові приміщення, офісні будівлі, спортивні комплекси та об'єкти торгово-розважальної інфраструктури. Таким чином, потенційні ризики для здоров'я, асоційовані з якістю повітря у внутрішньому середовищі, можуть перевищувати загрози, зумовлені забрудненням атмосферного повітря [1-6].

Починаючи з 1970-х років, серед мешканців новобудов, офісних приміщень та дошкільних закладів зросла частота неспецифічних клінічних проявів, які в медійному дискурсі отримали назву «службової хвороби». Її виникнення пов'язували з переходом від будівель із природною вентиляцією до енергоефективних споруд із підвищеною герметичністю [7]. У 1986 році ВООЗ запровадила термін «синдром хворої будівлі» (Sick Building Syndrome, SBS), зазначивши, що 10–30 % новозбудованих офісних будівель на Заході мають проблеми з якістю повітря в приміщеннях [8].

Незважаючи на актуальність проблеми, досі не існує чіткої класифікації негативних чинників СХБ: кліматичні та зовнішні забруднювальні фактори не виділені окремо, а деякі внутрішні, як-от антропогенні та тютюновий дим, згадуються у різних групах, що ускладнює їх систематизацію.

Мета роботи. Розроблення класифікації факторів, що визначають появу та перебіг синдрому хворої будівлі, з урахуванням зовнішніх та внутрішніх чинників.

Завдання роботи:

1. Проаналізувати сучасний стан вивчення синдрому хворої будівлі (СХБ) у науковій та нормативній літературі.
2. Розробити класифікацію факторів, що впливають на виникнення та перебіг СХБ.
3. Розглянути можливості поліпшення дії факторів СХБ природними біотехнічними фільтрами-рослинами.

Теоретичні основи дослідження

Класифікація шкідливих факторів, що асоціюються з розвитком синдрому хворої будівлі (СХБ), зазнала суттєвих змін у процесі еволюції наукових уявлень. У 1970-х роках, коли лише формувалася термінологічна база, дослідники зосереджували увагу на широкому спектрі параметрів внутрішнього середовища, включаючи мікрокліматичні показники (температура повітря і поверхонь, вологість, вентиляція), фізичні чинники (рівень шуму, вібрації, освітлення, електромагнітні поля), конструктивно-планувальні аспекти (ергономіка, дизайн, меблеве забезпечення), а також хімічні та біологічні забруднювачі (тютюновий дим, фталати, формальдегід, леткі органічні сполуки, мікроорганізми, біоциди, мікробні ЛОС, пил тощо). Окрему увагу приділяли також психосоціальним чинникам – гендеру, соціальному статусу та індивідуальним особливостям людини.

Публікації того періоду, здебільшого авторства фахівців у галузі медицини, акцентували на виявленні конкретних симптомів розладів здоров'я, зумовлених несприятливими умовами внутрішнього середовища. Надалі спостерігалася тенденція до класифікації шкідливих чинників за типами – фізичні, хімічні, біологічні, психологічні та особистісні, що дозволяло формалізувати підхід до їх аналізу.

Згодом проблема СХБ набула міждисциплінарного характеру, що сприяло залученню фахівців з екології, архітектури, соціології, психології та інших галузей. Було усвідомлено, що СХБ є соціальним феноменом, який вимагає дослідження великих вибірок і врахування множинних індивідуальних змінних. Зокрема, виявлено, що підвищений ризик розвитку СХБ спостерігається серед жінок, осіб із серцево-судинними захворюваннями,

алергіями, а також серед соціально вразливих категорій населення – людей похилого віку, осіб з інвалідністю, дітей та представників низького соціального статусу, які змушені тривалий час перебувати у закритих приміщеннях.

З розвитком хімії та впровадженням новітніх будівельних і оздоблювальних матеріалів, а також інших інноваційних технологій, значно зросла роль хімічного чинника у формуванні синдрому хворої будівлі. Використання синтетичних компонентів, клеїв, фарб, пластиків та герметиків призвело до підвищеного вмісту летких органічних сполук, формальдегідів та інших токсичних речовин у повітрі внутрішніх приміщень.

З появою глобальної проблеми зміни клімату у дослідженнях СХБ окреслився новий підхід до класифікації негативних чинників. Зокрема, країни з високим рівнем економічного розвитку визнали, що СХБ не є винятково проблемою країн із низьким соціально-економічним статусом або лише вразливих груп населення. Будь-яка будівля – незалежно від географічного розташування чи рівня комфорту – може зазнавати впливу зовнішніх кліматичних і екологічних чинників, які посилюють дію внутрішніх забруднювачів. Такі чинники, як перегрів, переохолодження, надмірна вологість або сухість, впливають на конструктивні елементи будівлі, змінюючи мікроклімат і створюючи передумови для формування несприятливого середовища.

У зв'язку з цим постає необхідність перегляду існуючої класифікації чинників СХБ з урахуванням зовнішніх кліматичних, екологічних і глобальних змін, що впливають на функціонування будівель і здоров'я їхніх мешканців.

Деякі автори вважають важливими лише 4 критерії забруднення, а саме:

- твердими частинками;
- біологічне забруднення (як-от: пилок, грибки, пліснява, пилові кліщі тощо);
- фізичне забруднення, викликане такими агентами, як температура, світло і електромагнітні поля;
- і хімічне забруднення, яке включає леткі органічні сполуки на додаток до радону [9].

Саманех Бандехалі та ін. [10] поділяють внутрішні забруднювачі повітря приміщень на дві великі групи:.

1. Неорганічні забруднювачі: оксиди азоту, мікроелементи, ртуть, озон, тверді частинки, що вдихаються, азбест.
2. Органічні забруднювачі: леткі органічні сполуки, толуол і етилбензол, формальдегід, вуглекислий газ і діоксид вуглецю, ацетальдегід, акролеїн, нафталін, трихлоретилен, тетрахлоретилен.

На наш погляд, ця класифікація не є повною, оскільки вона не враховує інші забруднювачі повітря.

Класифікація летких органічних сполук (ЛОС) Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), адаптована з [11], наведена у табл. 1.

Варто зазначити, що наведена класифікація чинників синдрому хворої будівлі, попри її розширення за рахунок хімічних та кліматичних впливів, охоплює переважно лише одну категорію забруднювачів – і, відповідно, не може вважатися вичерпною.

Пандемія COVID-19 вивела проблему забруднення внутрішнього середовища приміщень на глобальний міжнародний рівень.

Таблиця 1. Класифікація летких органічних сполук ВООЗ [11]

Категорія	Абревіатура	Діапазон температур кипіння, °С
Дуже леткі (газоподібні) органічні сполуки	VVOCs	< 0 до 50
Леткі органічні сполуки	VOCs	50-240
Напівлеткі органічні сполуки	SVOCs	240-380
Органічні сполуки, пов'язані з твердими частками: органічні сполуки, пов'язані з частками	POCs	> 380

Незважаючи на це, на сьогодні не існує єдиної, дійсно вичерпної класифікації негативних факторів СХБ. Зокрема, у «Керівництві з якості повітря в приміщенні» Комісії США з безпеки споживчих товарів (CPSC) [12] виділено такі основні категорії забруднювачів повітря в приміщеннях: радон, тютюновий дим, біопрепарати, угарний газ, діоксид азоту, органічні гази, частини, що вдихаються, формальдегід та меблі, виготовлені з цих виробів із пресованої деревини, сечовиноформальдегідна пінна ізоляція, пестициди, азбест, plumbum (Pb).

Отже, станом на сьогодні відсутня універсальна та чітко сформульована класифікація негативних чинників СХБ. Кліматичні впливи не виокремлені як окрема категорія, а зовнішні забруднювачі, хоча й визнаються суттєвими, не отримали системного опису. Окрім того, низка внутрішніх забруднювачів – зокрема антропогенні та тютюновий дим – не інтегровані в єдину групу, а розподіляються між кількома категоріями, що ускладнює їх однозначну ідентифікацію та облік у загальній схемі.

В наявній державній класифікації «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [13] кліматичні фактори (температура, відносна вологість повітря, освітленість, швидкість руху повітря) відносяться до фізичних факторів. Також незрозумілим залишається питання щодо класифікації деяких забруднювачів, наприклад тютюнового диму та антропогенних, які є виділеннями від людини.

Таким чином, можна зазначити, що сучасна гігієнічна класифікація та класифікація діючих шкідливих факторів, яка наведена в ній, потребує розширення та удосконалення.

Результати дослідження

Виходячи з вищенаведеного, ми пропонуємо створення класифікації небезпечних факторів СХБ (рис. 1). В запропонованій класифікації пропонується поділяти фактори впливу на зовнішні та внутрішні. До факторів зовнішнього впливу пропонується введення кліматичних (температура, відносна вологість повітря, швидкість вітру, сонячна радіація), екологічних (хімічне забруднення повітря, біологічне забруднення), радіаційних (радіація від природних джерел, радіація від техногенних джерел) та відеоекологічних факторів (агресивна забудова, депресивні ландшафти, нестача озеленення, світлове забруднення).

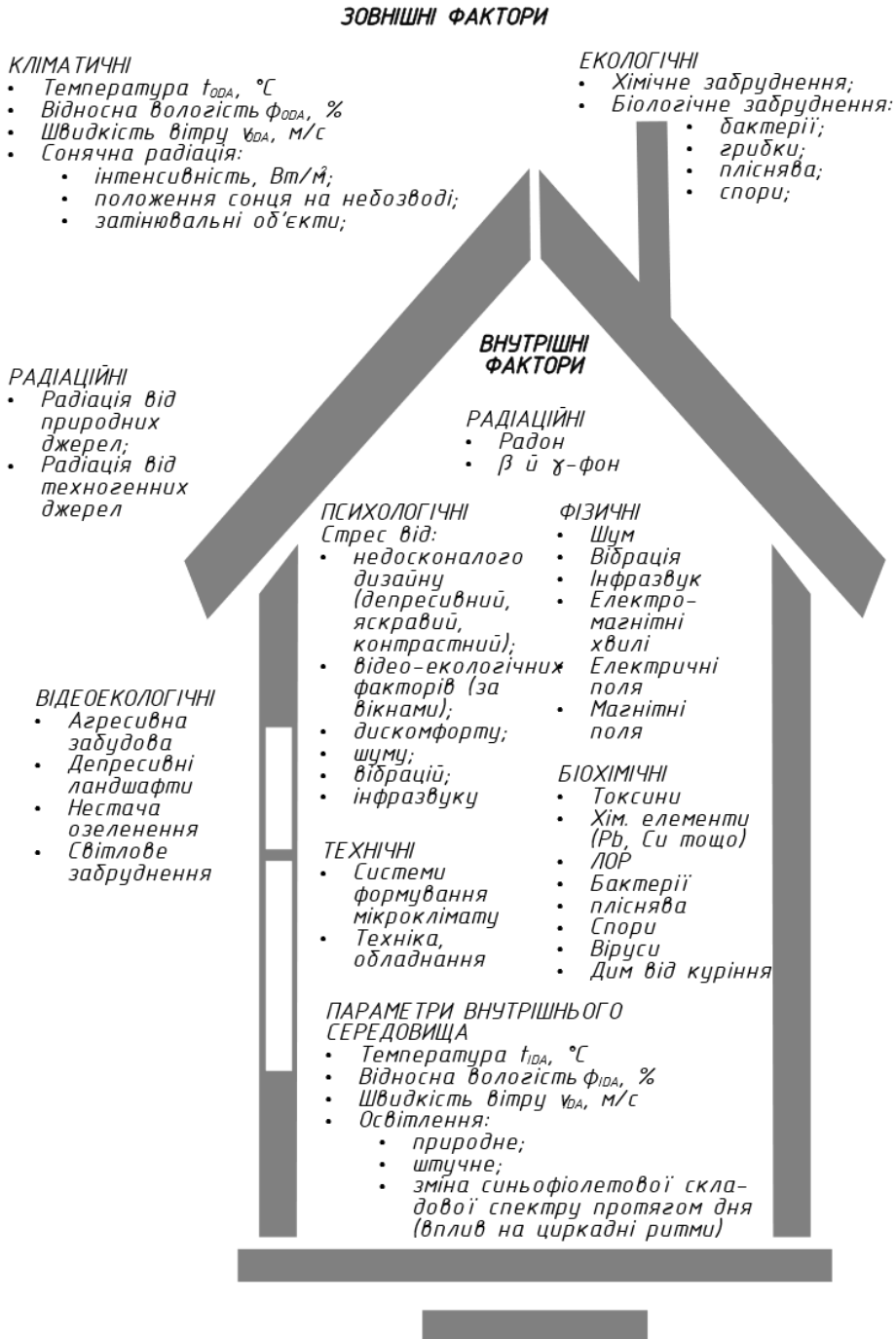


Рис. 1. Класифікація небезпечних факторів СХБ

Відеоєкологія – новий науковий напрямок, що розвиває аспекти візуального сприйняття навколишнього середовища. Даний напрямок з'явився завдяки доктору біологічних наук, автору теорії автоматії саккад (1987 р.) Василю Філіну. Процеси урбанізації, раціоналізації та індустріалізації призвели до появи штучного агресивного візуального середовища

з гомогенними полями: темно-сірий колір, прямі лінії та кути, міські будівлі в основному статичні та мають велику кількість площин, що негативно впливає на зорові процеси та призводить до психоемоційного розладу людини. В основі відеоекології лежить теорія саккад. Саккадою (в перекл. з франц. «сильний поштовх, ривок») називається швидкий рух ока, який здійснюється мимовільно, тобто в автоматичному режимі. Особливу неприємність для людини створюють гомогенні та «агресивні» поля. При спогляданні гомогенних агресивних полів виникають саккади більшої амплітуди, що спричинене пошуковими рухами очей, внаслідок чого очоруховий апарат змушений працювати в неекономічному режимі, що потребує зайвих витрат енергії, тоді як всі фізіологічні процеси намагаються працювати саме в режимі максимальної економії [14].

Сьогодні відеоекологічний підхід відіграє ключову роль у збереженні здоров'я людини. Пом'якшити негативні наслідки візуальної гомогенності можна шляхом інтеграції в архітектурно-будівельні рішення позитивних гетерогенних елементів – варіативних форм, кольорових акцентів та текстурних контрастів, а також за рахунок озеленення: використання живих рослин і «зелених» конструкцій як в інтер'єрах, так і в екстер'єрах будівель.

Тому цей фактор навколишнього середовища обов'язково потрібно враховувати у класифікації зовнішніх факторів СХБ.

Фактори внутрішнього середовища ми пропонуємо поділити на параметри:

- внутрішнього середовища (температура, відносна вологість, швидкість вітру, освітлення), фізичні (шум, вібрація, інфразвук, електромагнітні хвилі, електричні поля, магнітні поля);

- технічні (системи формування мікроклімату, техніка, обладнання), радіаційні (радон, β й γ -фон);

- психологічні (стрес від недосконалого дизайну та відеоекологічних факторів, дискомфорту, шуму, вібрації, інфразвуку);

- біохімічні (токсини, хімічні елементи, ЛОР, бактерії, пліснява, спори, віруси, дим від куріння).

Поліпшення параметрів внутрішнього середовища здійснюється за допомогою комплексу технічних засобів, спрямованих на нейтралізацію або зменшення впливу шкідливих чинників. Зокрема, для регулювання температурного режиму застосовуються системи опалення й кондиціонування повітря; рівень вологості коригується з використанням зволожувачів або осушувачів; освітленість оптимізується за допомогою світлозахисних рішень та енергоефективного освітлення. Для зниження концентрацій біохімічних забруднювачів використовуються побутові фільтраційні системи.

Водночас до ефективних природних засобів очищення середовища належать кімнатні рослини, які виконують функції біотехнічних фільтрів.

Біологічна дія кімнатних рослин охоплює широкий спектр параметрів внутрішнього середовища, впливаючи не на окремі показники, а на їхній взаємозв'язаний комплекс (рис. 2). Рослини сприяють підвищенню психоемоційного комфорту, стабілізації вологості повітря, поглинанню летких органічних сполук і вуглекислого газу, пригніченню патогенної мікрофлори завдяки виділенню фітонцидів, а також відлякуванню шкідників через наявність алелопатичних сполук і специфічного хімічного складу соку.



Рис. 2. Властивості природних біотехнічних фільтрів у приміщенні

Крім того, зелена біомаса сприяє зниженню шумового навантаження в приміщеннях. Завдяки цьому рослини ефективно інтегруються у біофільний дизайн та архітектурне зонування. З огляду на їхню здатність комплексно впливати на несприятливі чинники внутрішнього середовища, рослини розглядаються як перспективний, економічно доступний інструмент профілактики синдрому хворої будівлі, підвищення якості життєвого простору, гігієни праці та зміцнення здоров'я населення.

Однак, механізм впливу фітонцидних властивостей рослин на патогенну мікрофлору повітря приміщень ще недостатньо вивчений, відсутній асортимент перспективних фітонцидних рослин для різних типів приміщень.

Висновки та перспективи подальших досліджень

1. Європейські та національні класифікації небезпечних факторів СХБ мають низку недоліків і потребують вдосконалення та доповнення. У зв'язку з цим пропонується розроблення нової класифікації небезпечних факторів СХБ.

У рамках цієї класифікації передбачається поділ факторів впливу на зовнішні та внутрішні. До зовнішніх факторів пропонується введення кліматичних (температура, відносна вологість повітря, швидкість вітру, сонячна радіація), екологічних (хімічне забруднення повітря, біологічне забруднення), радіаційних (радіація від природних джерел, радіація від техногенних джерел) та відеоекологічних факторів (агресивна забудова, депресивні ландшафти, нестача озеленення, світлове забруднення). Фактори внутрішнього середовища пропонується поділити на параметри внутрішнього середовища (температура, відносна вологість, швидкість вітру, освітлення), фізичні (шум, вібрація, інфразвук, електромагнітні хвилі, електричні поля, магнітні поля), технічні (системи формування мікроклімату, техніка, обладнання), радіаційні (радон, β й γ -фон), психологічні (стрес від недосконалого дизайну та відеоекологічних факторів, дискомфорту, шуму, вібрації, інфразвуку) та біохімічні (токсини, хімічні елементи, ЛОР, бактерії, пліснява, спори, віруси, дим від куріння).

2. До ефективних засобів природної біотехнічної фільтрації належать рослини, вплив яких охоплює не окремі показники, а весь комплекс факторів внутрішнього середовища.

3. Рослини сприяють покращенню психоемоційного комфорту, збільшенню вологості повітря, поглинанню шкідливих речовин та секвестрації CO_2 . Вони також знищують патогенну мікрофлору завдяки виділенню фітонцидів, відлякують шкідників через алелопатичні речовини та хімічний склад рослинного соку і сприяють зменшенню шуму. З огляду на комплексний позитивний вплив рослин на зниження негативних факторів внутрішнього середовища, вони ефективно застосовуються в біофільному дизайні та зонуванні приміщень. Таким чином, рослини є перспективним, економічно доступним засобом для боротьби з СХБ, створення безпечного внутрішнього середовища, покращення гігієни праці та здоров'я людей.

4. Механізм впливу фітонцидних властивостей рослин на патогенну мікрофлору повітря приміщень ще недостатньо вивчений, відсутній асортимент перспективних фітонцидних рослин для різних типів приміщень. Отже, вивченню цих питань потрібно присвятити подальші дослідження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Ravindra, K., Kaur-Sidhu, M., Mor, S., Chakma, J., & Pillarisetti, A. (2021). Impact of the COVID-19 pandemic on clean fuel programmes in India and ensuring sustainability for household energy needs. *Environmental International*, 147, 106335. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106335>
2. National Human Activity Pattern Survey. The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. (2001). *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 11, 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
3. Harrison, R., Thornton, C., Lawrence, R., Mark, D., Kinnersley, R., & Ayres, J. (2002). Personal exposure monitoring of particulate matter, nitrogen dioxide, and carbon monoxide, including susceptible groups. *Occupational and Environmental Medicine*, 59, 671–679. <https://doi.org/10.1136/oem.59.10.671>
4. Soreanu, G., Dixon, M., & Darlington, A. (2013). Botanical biofiltration of indoor gaseous pollutants – a mini-review. *Chemical Engineering Journal*, 229, 585–594. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.06.074>

5. Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., et al. (2001). The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 11, 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
6. Vardoulakis, S. (2009). Human exposure: indoor and outdoor. *Air Quality in Urban Environments*, 28, 85–107. <https://doi.org/10.1039/9781847559654-00085>
7. Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349 (9057), 1013–1016. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(96\)07220-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(96)07220-0)
8. Contributors to Wikimedia projects. Sick building syndrome – Wikipedia. (n.d.). *Wikipedia, the free encyclopedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Sick_building_syndrome (date of access: 03.05.2025).
9. Kim, K. J., Khalekuzzaman, M. D., Suh, J. N., Kim, H. J., Shagol, C., Kim, H.-H., et al. (2018). Phytoremediation of volatile organic compounds by indoor plants: a review. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 59, 143–157. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0032-0>
10. Banderhali, S., Miri, T., Onyeaka, H., & Kumar, P. (2021). Current State of Indoor Air Phytoremediation Using Potted Plants and Green Walls. *Atmosphere*, 12 (4), 473. <https://doi.org/10.3390/atmos12040473>
11. Organization W. H. (1989). Indoor Air Quality: Organic Pollutants. Copenhagen, Denmark: World Health Organization Regional Office for Europe.
12. The Inside Story: A Guide to Indoor Air Quality. U.S. Consumer Product Safety Commission. (n.d.). <https://www.cpsc.gov/Safety-Education/Safety-Guides/Home/The-Inside-Story-A-Guide-to-Indoor-Air-Quality> (date of access: 03.05.2025).
13. *Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl «Hihiiienichna klasyfikatsiia pratsi za pokaznykamy shkidlyvosti ta nebezpechnosti faktoriv vyrobnychoho seredovyshcha, vazhkosti ta napruzhenosti trudovoho protsesu»* [On approval of the State sanitary norms and rules “Hygienic classification of labor by indicators of harmfulness and danger of production environment factors, severity and intensity of the labor process”] (Nakaz No. 248 dated April 8, 2014) (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>
14. *Hihiiienichna klasyfikatsiia pratsi (za pokaznykamy shkidlyvosti i nebezpeky faktoriv vyrobnychoho seredovyshcha, tiazhkosti i napruzhenosti trudovoho protsesu)*. [Hygienic classification of labor by indicators of harmfulness and danger of production environment factors, severity and intensity of the labor process] (Nakaz No. 4137-86, dated August 12, 1986, current as of May 30, 2014) (in Ukrainian). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86#Text>

Стаття надійшла до редакції 04.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 02.05.2025

The article was received 04.03.2025 and was accepted after revision 02.05.2025

Цюрюпа Юрій Володимирович

старший викладач, 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/0009-0001-2654-0270> e-mail: jurij.zurupa@gmail.com

Сахновська Вікторія Миколаївна

аспірантка 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/0000-0002-2489-7276> e-mail: vsahnovskaya@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 332.14:551.3(477)

Oleksiy Rogozhin, D.S. (Economics), Principal researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-9368> **e-mail:** olexarog@gmail.com

Victoria Trofymchuk, PhD, Senior researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5664-9575> **e-mail:** trofymchuk.vk@gmail.com

Ievgen Khlobystov, Prof., D.S. (Economics), Senior researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9983-9062> **e-mail:** ievgen.khlobystov@ukr.net

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

POSSIBLE MODELS OF REGIONAL ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC ASSESSMENT OF ENGINEERING AND GEOLOGICAL HAZARDS IMPACT ON THE STABILITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Abstract. *The article presents the results of justification of analytical tools for calculating the regional ecological and economic assessment of engineering and geological hazards impact on the stability of buildings and structures. Methodological approaches to performing an economic assessment of the negative impact of an engineering and geological factor on the stability of buildings based on determining the amount of caused or potential damage are considered. It is established that such an assessment is advisable to carry out within the framework of "cost" approach to the real estate objects assessment (based on the book or replacement value of the building), supplemented by "scenario" and "geoecological" approaches to identifying existing engineering and geological threats. The definition of geoecological scenarios reflecting the options for negative impact of seismicity and dangerous exogenous geological processes (hazards) and their territorial combinations allows, in the first approximation, to circumvent the unresolved issues of probability of these threats realization and predicting the degree of damage or destruction of structures as a result. The regional geoecological scenarios we have developed and the assessment models created on this basis reflect almost all mutually exclusive options for the territorial combination of engineering and geological hazards in Ukraine. However, due to the lack of data on the actual damage at the regional level, it was necessary to limit ourselves to a simplified indirect assessment of the hypothetical possibility of damage to structures based on available cartographic materials. It was emphasized that only the accumulation of databases on engineering characteristics, engineering and geological conditions, damage by causes, balance sheet and market value, etc. for all existing structures and buildings can radically improve the state of affairs with the assessment at the regional level.*

Key words: *ecological and economic assessment, regional impact scenarios, engineering and geological hazards, dangerous exogenous geological processes, buildings and structures.*

О.Г. Рогожин, В.О. Трофимчук, Є.В. Хлобистов

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

МОЖЛИВІ МОДЕЛІ РЕГІОНАЛЬНОЇ ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНОЇ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГІЧНИХ ЗАГРОЗ НА СТІЙКІСТЬ БУДІВЕЛЬ І СПОРУД

Анотація. У статті подано результати обґрунтування аналітичного інструментарію розрахунку регіональної еколого-економічної оцінки впливу інженерно-геологічних загроз на стійкість будівель і споруд. Розглянуто методологічні підходи до виконання економічної оцінки негативного впливу інженерно-геологічного фактору на стійкість будівель на основі визначення величини завданої або потенційної шкоди. Встановлено, що таку оцінку доцільно здійснювати в рамках «витратного» підходу до оцінювання об'єктів нерухомості (на основі балансової або відновної вартості будівлі), доповненого «сценарним» і «геоекологічним» підходами для ідентифікації наявних інженерно-геологічних загроз. Визначення геоекологічних сценаріїв, що відображають варіанти негативного впливу сейсміки і небезпечних екзогенних геологічних процесів (загроз) та їх територіальних поєднань, дає змогу у першому наближенні обійти не вирішені в загальному випадку питання імовірності реалізації цих загроз та передбачення ступеня пошкодження або руйнування конструкцій внаслідок цього. Розроблені нами регіональні геоекологічні сценарії і створені на цій основі моделі оцінювання відображають майже всі взаємовиключні варіанти територіального поєднання інженерно-геологічних загроз в Україні. Однак через брак даних щодо реально завданої шкоди на регіональному рівні довелося вимушено обмежитися спрощеною опосередкованою оцінкою гіпотетичної можливості пошкодження споруд за наявними картографічними матеріалами. Наголошено, що докорінно поліпшити стан справ з оцінкою на регіональному рівні може лише накопичення баз даних про інженерні характеристики, інженерно-геологічні умови, пошкодження за причинами, балансову і ринкову вартість тощо для всіх наявних споруд і будівель.

Ключові слова: еколого-економічна оцінка, регіональні сценарії впливу, інженерно-геологічні загрози, небезпечні екзогенні геологічні процеси, будівельні об'єкти і споруди.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.84-100>

Вступ

Врахування внеску інженерно-геотехнічного (загалом геосистемного) фактору у економічній оцінці завданої шкоди є недостатньо дослідженим теоретичним питанням, особливо в контексті оцінювання екосистемних послуг. Нам не вдалося знайти наукових публікацій на цю тему. Водночас у практиці оцінювання вартості об'єктів нерухомості наявні емпірично напрацьовані методичні підходи, які уможливають явне врахування зазначеного фактору в розрахункових моделях шляхом введення параметра імовірності реалізації інженерно-геологічних загроз пошкодження або руйнування споруд і комунікацій.

Специфікою оцінки пошкоджених внаслідок бойових обстрілів будівель і споруд є акцентування на визначенні величини їх *зношування* як залишкового ресурсу, що визначає *залишкову вартість* будівлі.

Аналіз літературних джерел [1-5] показав, що через недостатню розвиненість ринку нерухомості (за виключенням ринку житла) у практиці оцінювання будівель і споруд в Україні здебільшого застосовують методи так званих «витратного» та «порівняльного» методологічних підходів. Вони передбачають визначення у явному вигляді ступеня знецінення будівель, для чого використовують параметри їх рівня зношеності та терміну життя. Тому саме ці методи можуть бути використані для грошової оцінки втрати вартості будівель і споруд внаслідок бойових ушкоджень.

Зокрема, розрахункова величина залишкового ресурсу експлуатації пошкодженої споруди, визначена за спеціальними алгоритмами на основі натурних спостережень і обстежень (як частка від проектного ресурсу експлуатації), без проблем інтегрується у формули оцінки поточної вартості об'єкта нерухомості «витратними» методами на основі кошторису витрат на будівництво та за вартістю узагальнених показників будівельного аналога, а саме у формули (1) [4], (2) [2, с.64], (3) [1, с. 176]:

$$V = [Va \cdot (100 + I) \cdot (100 - WT)] / 10000 + VI, \quad (1)$$

де: V – ринкова вартість будинку;

Va – сума витрат на будівництво нового аналога оцінюваного будинку;

I – величина розумного прибутку інвестора у %;

WT – величина зношеності оцінюваного об'єкта (зворотна до величини залишкового ресурсу споруди) у %; $(100 - WT)$ є, фактично, величиною *залишкового ресурсу* експлуатації будівлі у % від його проектного (або доаварійного) значення, який може бути розрахований аналітично на основі об'єктивних даних обстежень стану будівельних конструкцій за достатньо надійними алгоритмами;

VI – вартість земельної ділянки як незабудованої.

$$Bo = Bземлі + Bвз - З, \quad (2)$$

де: Bo – ринкова вартість об'єкта нерухомості;

$Bземлі$ – ринкова вартість земельної ділянки як вільної та доступної для найбільш ефективного використання;

$Bвз$ – вартість відтворення ($Bв$) або заміщення ($Bз$) об'єкта;

$З$ – вартість загального знецінення (зношеності) об'єкта оцінки.

$$V_{звв} = H_B \cdot S \cdot (1 - K_3), \quad (3)$$

де: $V_{звв}$ – залишкова відновна вартість об'єкта нерухомості;

H_B – нормативна вартість 1 м² або 1 м³ аналогічного об'єкта на дату оцінки;

S – загальна площа або обсяги оцінюваного об'єкта;

K_3 – рівень зношеності об'єкта нерухомості (коефіцієнт); причому $(1 - K_3)$ є коефіцієнтом придатності об'єкта нерухомості (його залишкового ресурсу).

Тоді *розмір сукупної зношеності* (3) будівлі чи споруди, як грошова оцінка втраченого нею експлуатаційного ресурсу, становитиме $З = V_{звв} \cdot K_3$, де $V_{звв}$ – відновна вартість об'єкта.

Відповідно, грошову оцінку завданої шкоди легко отримати як різницю вартості будівлі до і після руйнівної атаки.

Явне врахування інженерно-геологічного ризику в рамках сучасної методології передбачається лише з метою ринкової оцінки вартості комерційної (що приносить дохід) нерухомості в рамках дохідного підходу (для оцінки ступеня задоволення інтересу покупця-інвестора) у складі методу «дисконтування грошових потоків» для визначення ставки дисконтування методом побудови (як складової екологічного ризику). Однак проблематичність отримання даних в умовах недостатньої розвиненості ринків та складність розрахунків перешкоджають виконанню таких оцінок в Україні.

Метою нашого дослідження є розроблення релевантного в умовах воюючої України аналітичного інструментарію *економічної оцінки інженерно-геологічної загрози* і на об'єктовому, і на регіональному рівнях.

Виклад основного матеріалу

На нашу думку, можливим способом врахування інженерно-геологічних загроз для цілісності несучих конструкцій споруд (передусім їх фундаментів) у економічних оцінках є введення відповідного коефіцієнта або до величини зношеності (WT), або до величини відновної вартості об'єкта (Va), наприклад, у формулі (1). У загальному випадку такий коефіцієнт інженерно-геологічної загрози (k_{gh}) має відобразити імовірність реалізації (p_{gh}) сейсмічних струшувань (інтенсивністю 6 балів і більше) та небезпечних екзогенних геологічних процесів (просадок, зсувів, карстових та техногенних проваль, активізованих підтопленням). Найдоцільніше ввести такий коефіцієнт при величині оціночної вартості як додатковий фактор, що безпосередньо впливає на зниження ціни, тобто: $Va \cdot k_{gh} = Va \cdot (1 - p_{gh})$.

На цій основі ми здійснили спробу наблизитися до вирішення проблеми врахування ризику реалізації (фактичного прояву) небезпечних екзогенних геологічних процесів в економічних оцінках із застосуванням логік «експозиційного» та «сценарного» підходів. Перший полягає у заміні показника імовірності реалізації загрози показником ступеня ураженості (експозиції) нею певної території, а другий (в нашому контексті) – у використанні різних показників і алгоритмів розрахунків для різних (найвірогідніших) сценаріїв розвитку подій, що визначають наявність та/або реалізацію різних загроз для стійкості будівельних споруд.

Моделі об'єктового рівня еколого-економічної оцінки.

У загальному випадку грошову оцінку впливу інженерно-геологічного фактору на об'єктовому рівні припустимо інтерпретувати як різницю ринкової вартості будівлі без (V) і з врахуванням (Vg) імовірності реалізації такої загрози, тобто як величину втрати вартості будівлі від цього (LVg) за інших рівних умов: $LVg = V - Vg$.

Ринкову вартість будівлі (V) припустимо розраховувати витратним методом за формулою (1), а урахування впливу інженерно-геологічного фактору здійснити відповідним коефіцієнтом до неї. У загальному випадку цей коефіцієнт (k_{gh}) має відображати імовірність реалізації інженерно-геологічних загроз. Тоді:

$$Vg = [Va \cdot (100 + I) \cdot (100 - WT) \cdot (1 - p_{gh})] / 10000 + VI \cdot (1 - p_{gh}), \quad (4)$$

де: Va – сума витрат на будівництво нового аналога оцінюваної споруди (вартість відновлення);

I – величина розумного прибутку інвестора у %;

WT – величина зношеності оцінюваного об'єкта (зворотна до величини залишкового ресурсу споруди) у %;

VI – вартість земельної ділянки як незабудованої;

p_{gh} – сумарна імовірність реалізації інженерно-геологічних загроз.

Потребують врахування ті загрози, які можуть спричинити пошкодження та/або руйнування будівельних конструкцій, а саме: природні та антропогенні сейсмічні струшування (інтенсивністю 6 балів і більше) та кожний з небезпечних екзогенних геологічних процесів (просадки, зсуви, карстові, суфозійні та техногенні провалля, активізовані підтопленням). Відповідно, розглядається сумарна імовірність всіх цих факторів за найпростішою моделлю: $p_{gh} = p_s + p_p + p_l + p_{pr}$, де: p_s – імовірність сейсмічних струшувань, p_p – імовірність просадок, p_l – імовірність зсувів, p_{pr} – імовірність проваль (карстових, суфозійних та техногенних).

Якщо ж замість вартості відновлення використати відображену в документах технічної інвентаризації балансову вартість (BV) споруди і земельної ділянки (BVI) з урахуванням інфляції до часу здійснення оцінки (індексу споживчих цін або монетарної інфляції i за цей період у %), то формула (4) без врахування інтересу інвестора набуде вигляду:

$$Vg = [BV \cdot i \cdot (100 - WT) \cdot (1 - p_{gh})] / 10000 + [BVI \cdot i \cdot (1 - p_{gh}) / 100]. \quad (5)$$

Але імовірність реалізації події на території оцінюваного об'єкта може бути строго розрахована лише для природної сейсміки за відомою методикою, наведеною у [6, 7].

Пропонуємо наблизитися до вирішення цієї проблеми на основі логіки «експозиційного» та «сценарного» підходів. Перший полягає у заміні показника імовірності реалізації загрози показником ступеня ураженості (експозиції) нею певної території, другий (в нашому контексті) – у використанні різних показників і алгоритмів розрахунків для різних сценаріїв розвитку подій (наявність та/або реалізація різних загроз для стійкості споруд).

В рамках «експозиційного» підходу для загроз просадок, зсувів та проваль заміником показника імовірності їх реалізації може бути показник (коефіцієнт) експозиції (ступеня ураженості) ними території в межах периметра споруди (uk_i) та її земельної ділянки (ul_i) за результатами інженерно-геологічних досліджень. Відповідно, для споруди $p_{gh} \approx uk_{ghK} = p_s + uk_p + uk_l + uk_{pr}$, а для земельної ділянки – $p_{gh} \approx uk_{ghL} = p_s + ul_p + ul_l + ul_{pr}$. З урахуванням цього формула (5) набуває вигляду:

$$Vg = [BV \cdot i \cdot (100 - WT) \cdot (1 - uk_{ghK})] / 10000 + [BVI \cdot i \cdot (1 - uk_{ghL}) / 100]. \quad (6)$$

Зрозуміло, що розмірність цих коефіцієнтів має бути уточнена за результатами практичних оцінок реальних об'єктів, оскільки їх сума може перевищити 1. Попереднім вирішенням цієї колізії може бути врахування лише максимального значення експозиції, тобто: $uk_{ghK} \approx p_s + uk_{max}$ та $uk_{ghL} \approx p_s + ul_{max}$.

Найбільш негативним сценарієм розвитку подій щодо порушення інженерно-геологічної безпеки споруди є фактичний прояв загроз на її території (сейсмічної події та/або небезпечних інженерно-геологічних процесів).

В разі реалізації (фактичного прояву) цих загроз може бути експертно визначений показник (коефіцієнт IN_i) *ступеня пошкодження оцінюваної споруди*, спричиненого кожним з цих небезпечних явищ, за напівкількісною (ранговою) шкалою пошкоджень¹, наприклад: слабкі (поодинокі тріщини, перекоси, розриви проводки тощо – 0,1), середні (тріщини у стінах, перекоси віконних та дверних коробок, розриви кабелів і трубопроводів тощо – 0,3), сильні (деформації фундаментів, стін, інших несучих конструкцій, масовий вивал вікон і дверей тощо – 0,5), руйнівні (масові розриви і часткове обрушення несучих конструкцій – 0,75), нищівні (повне руйнування із масовим обрушенням несучих конструкцій – 1,0). В такому разі доцільно врахувати вплив лише тієї загрози, яка спричинить найбільші пошкодження споруди у формі $(1 - IN_{max})$. Тоді формула (6) набуває вигляду:

$$Vg = [BV \cdot i \cdot (100 - WT) \cdot (1 - IN_{max})] / 10000 + [BVI \cdot i \cdot (1 - uk_{ghL}) / 100]. \quad (7)$$

Зрозуміло, що нищівні пошкодження обнуляють балансову вартість будівлі та значно зменшують ціну земельної ділянки (наскільки – потребує спеціального дослідження).

Крім того, в разі відсутності пошкодження споруди внаслідок небезпечних геологічних процесів доцільно розглянути можливі в умовах України сценарії різних поєднань інженерно-геологічних загроз, що сформувалися під впливом підтоплення у *різних екологічних та сейсмічних умовах*, тобто доповнити «сценарний» підхід *геоекологічним*.

Причому на об'єктовому рівні практично цікавить лише загальна грошова оцінка *взаємопов'язаного комплексу інженерно-геологічних загроз*, наявних у цьому місці (їх інтегрального впливу). Тобто зазвичай не відбувається спеціальне виокремлення впливу кожної загрози, оскільки задача визначення ринкової ціни споруди не потребує цього. Акцент тут робиться на можливих або вже реалізованих руйнівних наслідках та на ціні їх компенсації (чи подолання) у порівнянні з грошовою оцінкою без врахування таких загроз або їх реалізованих наслідків.

Моделі регіонального рівня еколого-економічної оцінки.

На регіональному рівні оцінка комплексів інженерно-геологічних загроз закономірно стає більш узагальненою (через недостатність даних) і набуває чіткої територіальної прив'язки. У загальному випадку *регіональна оцінка економічної шкоди від реалізації інженерно-геологічних загроз* ($LVgr$) потребуватиме визначення вартості всіх пошкоджених споруд i на території без (Vgr) і з врахуванням пошкоджень (VGr), тобто:

$$LVgr = Vgr - VGr, \quad (8)$$

$$\text{де: } Vgr = \sum_{i=1}^n \left[\frac{BV_i(in)(100 - WT_i)}{10000} + \frac{BVI_i(in)}{100} \right];$$

$$VGr = \sum_{i=1}^n \left[\frac{BV_i(in)(100 - WT_i)(1 - IN_i)}{10000} + \frac{BVI_i(in)(1 - uk_{ghL})}{100} \right];$$

BV_i – балансова вартість i -тої пошкодженої від реалізації інженерно-геологічних загроз споруди;

¹ Шкала пошкоджень потребує уточнення, для чого доцільно здійснити спеціальне дослідження.

WT_i – величина зношеності пошкодженого об'єкта (зворотна до величини залишкового ресурсу споруди) у %;

BVI_i – балансова вартість земельної ділянки i -тої пошкодженої споруди;

IN_i – коефіцієнт ступеня пошкодження i -тої споруди;

uk_{ghL} – коефіцієнт ступеня ураженості земельної ділянки інженерно-геологічними загрозами (просадками, зсувами, провалами тощо);

n – кількість пошкоджених споруд в регіоні;

in – індекс інфляції за період з часу визначення балансової вартості, %.

Зрозуміло, що такий простий підхід до регіональної оцінки на основі узагальнення об'єктової інформації наражається на практично нездоланні труднощі в частині отримання вхідних даних, оскільки статистика пошкодження споруд небезпечними геологічними процесами в Україні централізовано не ведеться, а накопичення бази даних про це в розрізі окремих об'єктів не відбувається.

Тому доводиться використовувати опосередкований підхід, коли здійснюється грошова оцінка *потенційної шкоди* від ще не реалізованих загроз на основі аналізу доступної картографічної інформації про їх поширеність, інтенсивність та імовірність.

Ще однією складністю є недоступність архівних даних муніципальних Бюро технічної інформації про будинки і споруди в населених пунктах України, через що неможливо отримати реальну величину навіть загальної кількості будинків і споруд різних типів на територіях, що досліджуються. Доводиться використовувати розрахунковий підхід на основі орієнтовних припущень щодо розподілу населення по садибних і багатоквартирних будинках в сільських і міських населених пунктах. Щодо населення також маємо його розподіл по населених пунктах лише за даними перепису 2001 р.

Доводиться також вводити додаткові припущення щодо імовірності реалізації інженерно-геологічних загроз та можливих пошкоджень будівель і споруд внаслідок цього.

Через це регіональна економічна оцінка загроз практично можлива лише в рамках еколого-сценарного підходу, на основі картометричного визначення поширених в Україні територіальних поєднань (комплексів) загроз як основи для оцінки потенційної шкоди в ареалах їх поширення.

Ареали поширення регіональних сценаріїв поєданого впливу інженерно-геологічних загроз для стійкості будівель і споруд можуть бути визначені інструментами ГІС-аналізу в середовищі ArcGIS 10.3 за умовами, наведеними в табл. 1 на основі наявної картографічної інформації, тобто з використанням шарів таких електронних карт:

1. Карта прояву та розвитку підтоплення за причинами на території України на 2015 р., оновлена нами [8].
2. Шар зсувонебезпечних ареалів (2005 р., “Геоінформ” Держгеолслужби України).
3. Шар карстонебезпечних ареалів (2005 р., “Геоінформ” Держгеолслужби України).
4. Карта поширення лесових ґрунтів за просіданням на території України (1995 р., “Геоінформ” Мінгео України).
5. Карта-схема впливу інженерно-геологічних умов на техногенне приращення сейсмичності території УССР (“Геоінформ” Мінгео України, 1990 р.).

Таблиця 1. Регіональні сценарії поєднаного впливу інженерно-геологічних загроз для стійкості будівель і споруд в Україні

<i>j</i>	Назва сценарію	Загрози	Засоби ідентифікації інструментами ГІС-аналізу
11	Перезволожені лесові породи в ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I \geq 6$ балів у ареалах загрози зсувоутворення.	Сейсміка, просадки, провалля, зсуви	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення, поширення лесових порід, ризику сумарної сейсмічності $I \geq 6$ та зсувоутворення за виключенням ареалів ризику карстоутворення.
12	Перезволожені лесові породи в ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I \geq 6$ балів на підстилаючих вапняках	Сейсміка, просадки, провалля, карст/суфозія	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення, поширення лесових порід, сумарної сейсмічності $I \geq 6$ та карстоутворення за виключенням ареалів ризику зсувоутворення.
13	Перезволожені лесові породи в ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I \geq 6$ балів не на вапняках і поза ареалами загрози зсувоутворення.	Сейсміка, просадки, провалля	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення, поширення лесових порід, сумарної сейсмічності $I \geq 6$ за виключенням ареалів ризику зсувоутворення та карстоутворення.
14	Перезволожені лесові породи в ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I \geq 6$ балів у ареалах загрози зсувоутворення не на підстилаючих вапняках.	Сейсміка, просадки, провалля, зсуви, карст/суфозія	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення, поширення лесових порід, ризику сумарної сейсмічності $I \geq 6$ та зсувоутворення за виключенням ареалів ризику зсувоутворення та ризику карстоутворення.
2	Перезволожені лесові породи в ареалах загрози зсувоутворення та ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I < 6$ балів.	Зсуви, просадки	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення, поширення лесових порід, ризику зсувоутворення за виключенням ареалів ризику сумарної сейсмічності $I \geq 6$.
3	Перезволожені лесові породи на підстилаючих обводнених вапняках в ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I < 6$ балів.	Просадки, карст/суфозія	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення, поширення лесових порід, ризику карстоутворення за виключенням ареалів ризику сумарної сейсмічності $I \geq 6$.
4	Обводнені підстилаючі вапняки під чохлам пісків або глин, тобто не на лесах	Карст/суфозія	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення та карстоутворення за виключенням території поширення лесових порід
5	Перезволожені лесові породи поза ареалами загрози зсуво- та карстоутворення в ареалі сумарної сейсмічності з інтенсивністю $I < 6$ балів.	Просадки	Перетин картографічних шарів ризику підтоплення та поширення лесових порід за виключенням ареалів ризику сумарної сейсмічності $I \geq 6$, ризику карстоутворення та ризику зсувоутворення.

Територіальне зіставлення (перетин) картографічних шарів поширення кожного зі сценаріїв поєднання інженерно-геологічних загроз j з картографічним шаром контурів населених пунктів (частина електронної топокарти М 200000) дає можливість визначити для кожного з поселень b ступінь експозиції його території загрозами ($h_{bj} = S_{bj} / S_b$), зазначеними у сценаріях j (як частку загроженої території у %). Атрибутивна інформація для кожного населеного пункту, крім його площі (S_b), містить дані про чисельність сільського (rur_b) і міського (urb_b) населення (станом на 2001 р.). Це дає змогу орієнтовно визначити для j -того сценарію кількість експонованих загрозами садибних (сільських) будинків bu^j за умовним нормативом ² $a_{rur}=3$ особи на

1 будинок ($bu^j = \frac{\sum_{bj} rur_{bj}}{a_{rur}}$), та кількість багатоквартирних будинків bb^j за

умовним нормативом ² $a_{urb}=100$ осіб на 1 будинок ($bb^j = \frac{\sum_{bj} urb_{bj}}{a_{urb}}$). Причому

врахування середньої відновної вартості садибного (c_1) та багатоквартирного (c_2) будинків (наприклад, за даними табл. 2: $c_1 = \$19,1-23,2$ тис. і $c_2 = \$909-1364$ тис.) дає можливість отримати максимальну оцінку вартості житлових споруд (її можна інтерпретувати як мінімальну оцінку вартості усіх споруд, Vgr^j), експонованих j -тим сценарієм поєднання інженерно-геологічних загроз. Тобто у загальному випадку:

$$Vgr^j = c_1 \frac{\sum_{bj=1}^d rur_{bj}}{a_{rur}} + c_2 \frac{\sum_{bj=1}^v urb_{bj}}{a_{urb}}; \quad (9)$$

де: d – кількість сільських населених пунктів, експонованих сценарієм j ;

v – кількість міських населених пунктів, експонованих сценарієм j .

Тоді мінімальна оцінка вартості споруд з врахуванням потенційних пошкоджень за j -тим сценарієм поєднання інженерно-геологічних загроз (VGr^j) у загальному випадку становитиме:

$$VGr^j = Vgr^j \cdot i \cdot (1 - p_{gh}^j) / 100, \quad (10)$$

де: Vgr^j – мінімальна оцінка вартості усіх споруд в ареалі, експонованому j -тим сценарієм поєднання інженерно-геологічних загроз;

i – індекс інфляції з часу визначення нормативів c_1 та c_2 (середньої вартості садибних та багатоквартирних будинків);

p_{gh}^j – імовірність реалізації суми присутніх за j -тим сценарієм інженерно-геологічних загроз, коефіцієнт; $p_{gh}^j = p_s^j + ul_p^j + ul_l^j + ul_{pr}^j$;

p_s^j – імовірність сейсмічних струшувань у ареалі поширення j -того сценарію, згідно з ЗСР-2004 ($p_s^j = 10^{-3}$);

ul_p^j – коефіцієнт ступеня експозиції (ураженості) території ареала поширення j -того сценарію реальними проявами просадковості;

² Належне обґрунтування значень нормативів a_{rur} та a_{urb} потребує здійснення спеціального статистичного дослідження на основі даних перепису населення та/або документації Бюро технічної інформації (БТІ).

ul_i^j – коефіцієнт ступеня експозиції (ураженості) території ареала поширення j -того сценарію реальними проявами зсувів;
 ul_{pr}^j – коефіцієнт ступеня експозиції (ураженості) території ареала поширення j -того сценарію реальними проявами проваль.

Таблиця 2. Реальні ціни та розрахункова вартість комерційного будівництва в Україні

		Рік оцінки	Тис. грн.	\$ тис.	Обмінний курс
Вартість будівництва садибних будинків					
1	100 м ² під ключ, з інженерними комунікаціями та поправкою на інфляцію	2021	3000-3500	109,95-128,28	27,2846
2	100 м ² без інженерних комунікацій та поправкою на інфляцію	2021	1783,148	65,354	27,2846
2	Невеликий, 55 м ² ; 6.01.2025 р.	2025	805,000	19,126	42,0889
3	Економ; 6.01.2025 р.	2025	975,000	23,165	42,0889
4	Стандарт; 6.01.2025 р.	2025	2920,000	69,377	42,0889
5	Преміум; 6.01.2025 р.	2025	11685,000	277,627	42,0889
Середня вартість будівництва 1 м ² у комерційних новобудовах					
1	01.10.2020, Україна	2020	13,231	0,4670	28,3105
2	03.2024, Київська область (без м. Київ)	2024	31,4	0,8194	38,325
3	03.2024, Волинська область	2024	31,4	0,8194	38,325
4	03.2024, Дніпропетровська область	2024	40,9	1,0672	38,325
5	6.01.2025, невеликий садибний будинок	2025	14,636	0,3477	42,0889
Розрахункова вартість будівництва умовного багатоквартирного будинку					
1	Аналог 70-квартирної 5-поверхової «хрущовки» (2615 м ² × \$0,3477 тис.)	2025	-	909,24	42,0889
2	Аналог 105-квартирної 5-поверхової «хрущовки» (3922,5 м ² × \$0,3477 тис.)	2025	-	1363,85	42,0889

Джерела: [9], [10], [11], [12], [13].

У кожному із сценаріїв параметр $(1 - p_{gh}^i)$ конкретизується згідно з набором наявних у ньому інженерно-геологічних загроз (див. табл. 1). В разі відсутності даних обстежень поширеності реальних проявів цих загроз, умовно приймається, що відповідний коефіцієнт імовірності (експозиції) становить 0,1 у кожному випадку, крім сейсмічності.

Продовжуючи вводити припущення, можливо врахувати орієнтовну величину пошкоджень споруд для кожної інженерно-геологічної загрози коефіцієнтом in , оціненим за ранговою шкалою, яку використовує формула (7). Приймаємо, що просадки викликають, як максимум, середні пошкодження ($in_p = 0,3$), зсуви – нищівні пошкодження ($in_l = 1,0$), карстові, техногенні чи сейсмогенні провалля – руйнівні пошкодження ($in_{pr} = 0,75$), а сейсмічні події інтенсивністю 6 балів і більше на перезвожених лесах – сильні пошкодження ($in_s = 0,5$) рядової забудови.

Описаний вище підхід можна реалізувати і для *регіональної оцінки прибудинкових територій*, але для цього потрібно знати середню по Україні площу прибудинкових ділянок для садибних і багатоквартирних будинків та їхню середню вартість. Припущення, що середня площа прибудинкової ділянки для садибного будинку³ становить приблизно 5 соток ($s_{rur} = 500 \text{ м}^2$), а для багатопверхового³ – до 25 соток ($s_{urb} = 2500 \text{ м}^2$) інтуїтивно виглядає доволі вірогідним. Це дає можливість розрахувати загальну площу прибудинкових земельних ділянок для садибної і багатопверхової забудови $s_{bu}^j = bu^j \cdot s_{rur}$ та $s_{bb}^j = bb^j \cdot s_{urb}$, відповідно. Середню вартість 1 м^2 присадибної землі умовно приймаємо $c_3 = \$50$, а 1 м^2 прибудинкової землі у містах – $c_4 = \$275$ (за даними табл. 3).

Таблиця 3. Середня вартість 1 м^2 землі під забудову в Україні у 2024 р.

		1 сотка, \$	1 м ² , \$
1	Мінімальна 1	1000	10
2	Мінімальна 2	5000	50
3	Середня	27500	275
4	Максимальна	50000	500

Джерела: [14], [15].

Тоді орієнтовна оцінка земельної ділянки в ареалі поширення j -того сценарію без врахування інженерно-геологічних загроз ($Vgrl^j$) у загальному випадку виглядатиме таким чином:

$$Vgrl^j = c_3 \frac{\sum_{bj=1}^d rur_{bj}}{a_{rur}} S_{rur} + c_4 \frac{\sum_{bj=1}^v urb_{bj}}{a_{urb}} S_{urb}; \quad (11)$$

де: $\sum_{bj=1}^d rur_{bj}$ – кількість сільського населення в ареалі поширення j -того сценарію;

$\sum_{bj=1}^v urb_{bj}$ – кількість міського населення в ареалі поширення j -того сценарію;

a_{rur} – середня кількість мешканців у садибному будинку ($a_{rur} = 3$);

a_{urb} – середня кількість мешканців у багатоквартирному будинку ($a_{urb} = 100$).

Відповідно, оцінка *прибудинкової земельної ділянки з врахуванням інженерно-геологічних загроз* у загальному випадку за тих самих припущень щодо імовірності і ураженості ними території, що й для споруд (див. формули (25-31), становитиме:

$$VGr^j = Vgrl^j \cdot i \cdot (1 - p_{gr}^j) / 100. \quad (12)$$

Тоді *мінімальна регіональна оцінка потенційної економічної шкоди* для споруд і прибудинкових ділянок від реалізації інженерно-геологічних загроз в ареалі поширення j -того сценарію поєднаного впливу цих загроз ($Lvgr_{min}^j$) дорівнює:

³ Належне обґрунтування значень нормативів s_{rur} та s_{urb} потребує здійснення спеціального статистичного дослідження на основі даних реєстрів нерухомості Мін'юсту України.

$$Lvgr_{min}^j = Vgr^j + Vgr^j - VGr^j - VGr^j. \quad (13)$$

Після всіх можливих уточнень на основі здійснення практичних розрахунків моделі умовної оцінки залишкової вартості споруд, наявні в ареалах поширення сценаріїв поєднаного впливу інженерно-геологічних загроз, набули вигляду (14-21):

$$1) VGr^{11} = Vgr^{11} \cdot i \cdot (1 - in_s \cdot p_s^{11} - in_p \cdot ul_p^{11} - in_{pr} \cdot ul_{pr}^{11} - in_l \cdot ul_l^{11}) / 100 = \quad (14)$$

$$= Vgr^{11} \cdot i \cdot (1 - 0,001 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot 0,3 - 0,1 \cdot 0,75 - 0,1 \cdot 1,0) / 100;$$

$$2) VGr^{12} = Vgr^{12} \cdot i \cdot (1 - in_s \cdot p_s^{12} - in_p \cdot ul_p^{12} - in_{pr} \cdot ul_{pr}^{12} - in_{pr} \cdot ul_{pr}^{12}) / 100 = \quad (15)$$

$$= Vgr^{12} \cdot i \cdot (1 - 0,001 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot 0,3 - 0,1 \cdot 0,75 - 0,1 \cdot 0,75) / 100;$$

$$3) VGr^{13} = Vgr^{13} \cdot i \cdot (1 - in_s \cdot p_s^{13} - in_p \cdot ul_p^{13} - in_{pr} \cdot ul_{pr}^{13}) / 100 = \quad (16)$$

$$= Vgr^{13} \cdot i \cdot (1 - 0,001 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot 0,3 - 0,1 \cdot 0,75) / 100;$$

$$4) VGr^{14} = Vgr^{14} \cdot i \cdot (1 - in_s \cdot p_s^{14} - in_p \cdot ul_p^{14} - in_{pr} \cdot ul_{pr}^{14} - in_l \cdot ul_l^{14} - in_{pr} \cdot ul_{pr}^{14}) / 100 = \quad (17)$$

$$= Vgr^{14} \cdot i \cdot (1 - 0,001 \cdot 0,5 - 0,1 \cdot 0,3 - 0,1 \cdot 0,75 - 0,1 \cdot 1,0 - 0,1 \cdot 0,75) / 100;$$

$$5) VGr^2 = Vgr^2 \cdot i \cdot (1 - in_p \cdot ul_p^2 - in_l \cdot ul_l^2) / 100 = Vgr^2 \cdot i \cdot (1 - 0,1 \cdot 0,3 - 0,1 \cdot 1,0) / 100; \quad (18)$$

$$6) VGr^3 = Vgr^3 \cdot i \cdot (1 - in_p \cdot ul_p^3 - in_{pr} \cdot ul_{pr}^3) / 100 = \quad (19)$$

$$= Vgr^3 \cdot i \cdot (1 - 0,1 \cdot 0,3 - 0,1 \cdot 0,75) / 100;$$

$$7) VGr^4 = Vgr^4 \cdot i \cdot (1 - in_{pr} \cdot ul_{pr}^4) / 100 = Vgr^4 \cdot i \cdot (1 - 0,1 \cdot 0,75) / 100; \quad (20)$$

$$8) VGr^5 = Vgr^5 \cdot i \cdot (1 - in_p \cdot ul_p^5) / 100 = Vgr^5 \cdot i \cdot (1 - 0,1 \cdot 0,3) / 100; \quad (21)$$

Уточнені моделі умовної оцінки прибудинкової земельної ділянки з врахуванням інженерно-геологічних загроз в ареалах поширення зазначених сценаріїв набули вигляду (22-29):

$$1) VGr^{11} = Vgr^{11} \cdot i \cdot (1 - p_s^{11} - ul_p^{11} - ul_{pr}^{11} - ul_l^{11}) / 100 = \quad (22)$$

$$= Vgr^{11} \cdot i \cdot (1 - 0,001 - 0,1 - 0,1 - 0,1) / 100;$$

$$2) VGr^{12} = Vgr^{12} \cdot i \cdot (1 - p_s^{12} - ul_p^{12} - ul_{pr}^{12} - ul_{pr}^{12}) / 100 = \quad (23)$$

$$= Vgr^{12} \cdot i \cdot (1 - 0,001 - 0,1 - 0,1 - 0,1) / 100;$$

$$3) VGr^{13} = Vgr^{13} \cdot i \cdot (1 - p_s^{13} - ul_p^{13} - ul_{pr}^{13}) / 100 = \quad (24)$$

$$= Vgr^{13} \cdot i \cdot (1 - 0,001 - 0,1 - 0,1) / 100;$$

$$4) VGr^{14} = Vgr^{14} \cdot i \cdot (1 - p_s^{14} - ul_p^{14} - ul_{pr}^{14} - ul_l^{14} - ul_{pr}^{14}) / 100 = \quad (25)$$

$$= Vgr^{14} \cdot i \cdot (1 - 0,001 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0,1) / 100;$$

$$5) VGr^2 = Vgr^2 \cdot i \cdot (1 - ul_p^2 - ul_l^2) / 100 = Vgr^2 \cdot i \cdot (1 - 0,1 - 0,1) / 100; \quad (26)$$

$$6) VGr^3 = Vgr^3 \cdot i \cdot (1 - ul_p^3 - ul_{pr}^3) / 100 = Vgr^3 \cdot i \cdot (1 - 0,1 - 0,1) / 100; \quad (27)$$

$$7) VGr^4 = Vgr^4 \cdot i \cdot (1 - ul_{pr}^4) / 100 = Vgr^4 \cdot i \cdot (1 - 0,1) / 100; \quad (28)$$

$$8) VGr^5 = Vgr^5 \cdot i \cdot (1 - ul_p^5) / 100 = Vgr^5 \cdot i \cdot (1 - 0,1) / 100; \quad (29)$$

Територіальний аналіз засобами ArcGIS 10.3 показав, що загальна площа, на якій поширені уточнені регіональні сценарії, становить понад 18% території України (табл. 4). Показово, що абсолютна більшість з них пов'язана з підтопленими лесовими ґрунтами (сценарії 11, 12, 13, 14, 2, 3, 5), вони поширені на майже 13% території України. За площею поширення у першу трійку входять сценарій 13 (45,6% від площі усіх сценаріїв), сценарій 4 (28,4%) та сценарій 12 (19,6%).

Таблиця 4. ГІС-оцінка площі поширення уточнених регіональних сценаріїв поєднання інженерно-геологічних загроз в Україні

		Площа, км ²	% від площі поширення всіх сценаріїв	% від площі усієї України
1	Сценарій 11	3307,5	3,1	0,55
2	Сценарій 12	21050,8	19,6	3,52
3	Сценарій 13	48894,8	45,6	8,18
4	Сценарій 14	739,9	0,69	0,12
5	Сценарій 2	86,98	0,08	0,01
6	Сценарій 3	1476,0	1,4	0,25
7	Сценарій 4	30447,7	28,4	5,10
8	Сценарій 5	1949,4	1,8	0,33
Всі сценарії		107953,2	100,0	18,07
Вся територія України		597542,2	-	100,00

Джерело: авторські розрахунки.

Найбільш загроженими регіонами за сценаріями, пов'язаними з підтопленими лесовими ґрунтами, виявилися Херсонська (48,3% від усієї площі регіону), Миколаївська (37,5%) та Полтавська (28,6%) області. Врахування всіх сценаріїв (тобто додавання до «лесових» сценаріїв сценарію 4, пов'язаного з підтопленими вапняками) змінює трійку лідерів. На перше місце за площею поширення всіх загроз виходить Волинська область (66,7% від усієї площі регіону), далі йдуть Херсонська (54,1%) та Рівненська (44,8%) області (табл. 5).

Таблиця 5. ГІС-оцінка регіональних відмінностей за площею поширення уточнених регіональних сценаріїв впливу інженерно-геологічних загроз в Україні

Регіони		Сценарії, пов'язані з підтопленими лесовими ґрунтами (11-14, 2, 3, 5)		Всі сценарії (11-14, 2-5)		
		км ²	% від усієї площі регіону	км ²	% від усієї площі регіону	% від площі поширення сценаріїв
Україна всього		77505,49	12,97	107953,21	18,07	100,00
1	АР Крим	3926,37	15,30	4515,79	17,60	4,18
2	Вінницька	1331,88	5,04	1375,14	5,20	1,27
3	Волинська	62,30	0,31	13430,50	66,74	12,44
4	Дніпропетровська	5363,13	16,83	5520,33	17,32	5,11
5	Донецька	2081,75	7,87	3002,75	11,35	2,78
6	Житомирська	1033,23	3,46	1033,23	3,46	0,96
7	Закарпатська	1007,81	7,91	1007,81	7,91	0,93
8	Запорізька	5574,18	20,63	5864,65	21,70	5,43
9	Івано-Франківська	0,10	0,00	1,25	0,01	0,00
10	Київська	2386,26	8,26	2386,26	8,26	2,21
11	Кіровоградська	884,44	3,61	893,16	3,64	0,83

Продовження таблиці 5

12	Луганська	1017,76	3,82	1963,62	7,37	1,82
13	Львівська	55,35	0,25	593,12	2,72	0,55
14	Миколаївська	8925,98	37,48	9581,09	40,23	8,88
15	Одеська	8998,26	27,03	9100,74	27,34	8,43
16	Полтавська	8202,00	28,61	8202,00	28,61	7,60
17	Рівненська	28,12	0,14	8972,80	44,81	8,31
18	Сумська	2599,69	10,92	3786,84	15,90	3,51
19	Тернопільська	8,06	0,06	10,61	0,08	0,01
20	Харківська	7000,02	22,31	7568,13	24,12	7,01
21	Херсонська	12272,81	48,34	13738,19	54,11	12,73
22	Хмельницька	43,00	0,21	43,00	0,21	0,04
23	Черкаська	1200,45	5,74	1200,45	5,74	1,11
24	Чернівецька	490,82	6,08	622,87	7,71	0,58
25	Чернігівська	3011,73	9,44	3538,89	11,09	3,28

Джерело: авторські розрахунки.

Результати практичного розрахунку величини потенційної економічної шкоди для споруд і прибудинкових ділянок за уточненими сценаріями поєднаного впливу інженерно-геологічних загроз наведені у табл. 6. Згідно з ними, лідером за потенційною економічною шкодою є сценарій 12 (перезволожені леси в ареалі сумарної сейсмічності $I \geq 6$ балів на підстилаючих вапняках), понад 43% від усієї суми.

Таблиця 6. Оцінка потенційної економічної шкоди за уточненими регіональними сценаріями поєднаного впливу інженерно-геологічних загроз в Україні

		Вартість загальна, \$ млрд			Вартість потенційної шкоди, \$ млрд		
		будинків	землі	Всього	будинкам	землі	Всього
1	Сценарій 11	0,841	7,408	8,249	0,173	2,230	2,403
	% від всіх	1,2	1,4	1,3	2,0	2,0	2,0
2	Сценарій 12	23,177	158,602	181,779	4,183	47,739	51,923
	% від всіх	32,5	29,3	29,7	47,6	43,0	43,3
3	Сценарій 13	30,262	230,026	260,288	3,193	46,235	49,428
	% від всіх	42,5	42,5	42,5	36,3	41,6	41,2
4	Сценарій 14	0,136	1,469	1,605	0,038	0,589	0,627
	% від всіх	0,19	0,27	0,26	0,43	0,53	0,52
5	Сценарій 2	0,000023	0,000266	0,000289	2,9304E-06	5,32771E-05	5,6208E-05
	% від всіх	0,000032	0,000049	0,000047	0,000033	0,000048	0,000047
6	Сценарій 3	0,573	4,343	4,916	0,060	0,873	0,933
	% від всіх	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8
7	Сценарій 4	15,204	132,022	147,226	1,140	13,202	14,343
	% від всіх	21,3	24,4	24,0	13,0	11,9	12,0
8	Сценарій 5	1,154	8,293	9,447	0,035	0,829	0,864
	% від всіх	1,6	1,5	1,5	0,4	0,7	0,7
Всі сценарії		71,211	540,694	611,906	8,784	111,109	119,893

Джерело: авторські розрахунки.

На другій позиції – сценарій 13 (перезволожені леси в ареалі сумарної сейсмічності $I \geq 6$ балів поза ареалами загроз зсувоутворення та карстоутворення), понад 36%. На третій позиції – сценарій 4 (підтоплені не лесові породи на карстонебезпечних територіях), понад 11% від усіх. Ці три сценарії обумовлюють понад 90% потенційної шкоди. Показово, що сценарії, пов'язані з підтопленими лесами (сценарії 11, 12, 13, 14, 2, 3, 5, тобто переважна більшість з врахованих), формують понад 87% потенційної шкоди.

Загальна оціночна вартість потенційної економічної шкоди за уточненими регіональними сценаріями поєднаного впливу інженерно-геологічних загроз в Україні для житлових будинків (садибних та багатоквартирних) становить до 8,8 \$ млрд. З урахуванням шкоди для прибудинкових земельних ділянок ця сума зростає до 120 \$ млрд. Зазначені величини припустимо інтерпретувати як мінімальну і максимальну оцінки потенційної економічної шкоди від інженерно-геологічних загроз в Україні, що відрізняються одна від одної більше, ніж на порядок.

Висновки

1. Грошову оцінку завданої шкоди легко отримати як різницю вартості будівлі до і після руйнівної атаки. Для оцінки вартості споруди, що зазнала бойового ураження, найкраще використовувати показник частки втраченого ресурсу її експлуатації (зворотної до частки залишкового ресурсу споруди), розрахований за даними спеціальних обстежень. Це суттєво зменшить суб'єктивність визначення величини грошової оцінки накопиченої зношеності пошкоджених споруд.

2. На об'єктовому рівні оцінку впливу інженерно-геологічного фактору на стійкість будівель і споруд із визначенням величини завданої або потенційної шкоди доцільно здійснювати в рамках «витратного» підходу до оцінювання об'єктів нерухомості (на основі балансової або відновної вартості будівлі), доповненого «сценарним» і «геоекологічним» підходами для ідентифікації наявних інженерно-геологічних загроз. Така оцінка істотно поліпшується шляхом виконання спеціальних натурних обстежень будівельних конструкцій та досліджень підґрунтя конкретних будівель.

3. Визначення геоекологічних сценаріїв для економічної оцінки, що відображають варіанти негативного впливу сейсміки і небезпечних екзогенних геологічних процесів (загроз) та їх територіальних поєднань, дає змогу у першому наближенні обійти не вирішені в загальному випадку питання імовірності реалізації цих загроз та передбачення ступеня пошкодження/руйнування конструкцій внаслідок цього.

4. Відсутність вхідних даних стосовно реально завданої шкоди спорудам (і прибудинковим ділянкам) від реалізації інженерно-геологічних загроз на регіональному рівні змушує використовувати істотно спрощену опосередковану оцінку гіпотетичної можливості пошкодження споруд на основі поєднання логік «витратного», «нормативного», «експозиційного» і, особливо, «сценарного» підходів. Розроблені нами регіональні геоекологічні сценарії відображають майже всі взаємовиключні варіанти територіального поєднання інженерно-геологічних загроз. Причому маємо змогу визначити орієнтовну кількість тільки житлових споруд і тільки двох їх узагальнених типів (садибних і багатоповерхових) на основі переписної кількості населення

в населених пунктах за експертно введеними умовними нормативами (наприклад, засобами ГІС-аналізу) у ареалах поширення кожного із сценаріїв поєднаного впливу врахованих загроз.

5. Запропоновані розрахункові моделі можуть бути уточнені шляхом відпрацювання на реальних даних методичних прикладів. Проте, докорінно поліпшити стан справ з оцінкою на регіональному рівні може лише накопичення і відкриття для дослідження баз даних про інженерні характеристики, інженерно-геологічні умови, пошкодження за причинами, балансову і ринкову вартість тощо для всіх наявних споруд і будівель (згідно з реєстрами БТІ, Мініюсту тощо) в усіх населених пунктах території, що вивчається.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пазинич В.І., Свистун Л.А. Оцінка об'єктів нерухомості: навч.пос. [для студ. вищ. навч. закл.] – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 434 с. – ISBN 978-966-364-891-0
2. Оцінка бізнесу та нерухомості: навч. пос. / за заг. ред. проф. В.Р. Кучеренко; уклад.: Я.П. Квач, Н.В. Сментина, В.О. Улибіна, А.В. Андрейченко. – 2-ге видання. – Одеса: Астропринт, 2013. – 235 с.
3. Крупка Я. Д. (2000). Прогресивні методи оцінки та обліку інвестиційних ресурсів. *Економічна думка*, (1), 350-354.
4. Як проводиться оцінка будинку: необхідні документи та критерії оцінки. <https://pareto.com.ua/ua/blog/yak-provoditsya-ocinka-budinku/>
5. Івченко О. Основні методи оцінки нерухомості та їх особливості. <https://pareto.com.ua/ua/blog/osnovni-metodi-ocinki-neruhomosti-ta-yih-osoblivosti/>
6. ДСТУ Б В.1.1-28:2010. Національний стандарт України. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011, – 79 с.
7. Сейсмический риск и инженерные решения. (1981) Пер. с англ. [Под ред. Ц. Ломнитца, Э. Розенблюта]. Москва: Недра, – 1981, 375 с.
8. Рогожин О. Г., Яковлев Є. О., Крета Д. Л. (2023) Оновлена електронна карта прояву та розвитку підтоплення за причинами в Україні // *Екологічна безпека та природокористування*. – 2023. – № 2 (46). – С. 124–137.
9. Турінов Олег. Вартість будівництва будинку в Україні в 2021 р. <https://z500.com.ua/ua/skolko-stoit-stroitelstvo-doma.html>
10. Карамнова Марія. Скільки коштує побудувати будинок в Україні у 2025 р. «Новий дім». 06.01.2025 р. <https://noviydom.com.ua/uk/skilky-koshtuye-pobuduvaty-budynok>
11. Ціна будівництва приватного будинку. Компанія DEWPOINT. <https://dewpoint.com.ua/uk/cena/>
12. Пилипенко Ярослав. Скільки коштує квадратний метр відбудови. 22.05.2024 р. <https://dozorro.org/blog/skilki-koshtuye-kvadratnij-metr-vidbudovi>
13. «Хрущовка». 21.10.2019. <https://rise.lviv.ua/content/article-item/hrushtovka-13.html>
14. Ціна на землю зростає, вартість 1 га землі вже 45 тис. грн. 19.04.2024. <https://superagronom.com/news/18814-tsina-na-zemlyu-zrostaye-vartist-1-ga-zemli-vje-45-tis-grn>
15. Розтр'юпа Василь. Скільки коштує 1 сотка землі під забудову в Україні в 2024 році. 31.07.2024 р. https://24tv.ua/agro24/zemlya-pid-zabudovu-skilki-koshtuye-1-sotka-2024-ukrayini_n2608282

Стаття надійшла до редакції 06.02.2025 і прийнята до друку після рецензування 05.05.2025

REFERENCES

1. Pazynych, V. I., & Svystun, L. A. (2009). Valuation of real estate: tutorial [for students of higher education institutions]. Kyiv: Center for Educational Literature. ISBN 978-966-364-891-0
2. Kvach, Ya. P., Smentyna, N. V., Ulibina, V. O., & Andreichenko, A. V. (2013). Business and real estate valuation: teaching aids. (V. R. Kucherenko, Ed.) (2nd ed.). Odesa: Astroprint.
3. Krupka, Ya. D. (2000). Progressive methods of assessment and accounting of investment resources. *Ekonomichna dumka*, (1), 350-354.
4. How a house is evaluated: required documents and evaluation criteria. Retrieved from <https://pareto.com.ua/ua/blog/yak-provoditsya-ocinka-budinku/>
5. Ivchenko, O. Basic methods of real estate valuation and their features. Retrieved from <https://pareto.com.ua/ua/blog/osnovni-metodi-ocinki-neruhomosti-ta-yih-osoblivosti/>
6. National Standard of Ukraine Б Б.1.1-28: 2010. (2011). Protection against hazardous geological processes, harmful operational influences, and fire. Kyiv: Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine, 79 p. [in Ukrainian].
7. Leggett, R. (1976). Cities and geology. Moscow: Mir [in Russian].
8. Rogozhin, O. G., Yakovlev, E. O., & Kreta, D. L. (2023). The updated electronic map of the overwetting manifestation and development by causes in Ukraine. *Environmental safety and natural resources*, 2 (46), 124-137 [in Ukrainian].
9. Turinov, O. The cost of building a house in Ukraine in 2021. Retrieved from <https://z500.com.ua/ua/skolko-stoit-stroitelstvo-doma.html>
10. Karamnova, M. How much does it cost to build a house in Ukraine in 2025. "New House". 06.01.2025. Retrieved from <https://noviydom.com.ua/uk/skilky-koshtuye-pobuduvaty-budynok>
11. The price of building a private house. DEWPOINT Company. <https://dewpoint.com.ua/uk/cena/>
12. Pilypenko, Ya. How much does a square meter of reconstruction cost? 22.05.2024. Retrieved from <https://dozorro.org/blog/skilki-koshtuye-kvadratnij-metr-vidbudovi>
13. «Khrushchovka». 21.10.2019. <https://rise.lviv.ua/content/article-item/hrushtovka-13.html>
14. The price of land is increasing, the cost of 1 hectare of land is already 45 thousand UAH. 19.04.2024. Retrieved from <https://superagronom.com/news/18814-tsina-na-zemlyu-zrostaye-vartist-1-ga-zemli-vje-45-tis-grn>
15. Roztreopa, V. How much does 1 acre of land for development cost in Ukraine in 2024. 31.07.2024. Retrieved from https://24tv.ua/agro24/zemlya-pid-zabudovu-skilki-koshtuye-1-sotka-2024-ukrayini_n2608282

The article was received 06.02.2025 and was accepted after revision 05.05.2025

Рогожин Олексій Георгійович

доктор економічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8101-9368> **e-mail:** olexarog@gmail.com

Трофимчук Вікторія Олександрівна

кандидат економічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-5664-9575> **e-mail:** trofymchuk.vk@gmail.com

Хлобистов Євген Володимирович

доктор економічних наук, професор, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186 Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** ievgen.khlobystov@ukr.net

УДК 504.064

Natalia Bushueva, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Project Management

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4969-7879> **e-mail:** Natbush@ukr.net

Yevhen Lobok, Postgraduate Student of the Department of Project Management

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-9841-1132> **e-mail:** ownereugene@gmail.com

Gleb Murovansky, Postgraduate Student of the Department of Project Management

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4610-9087> **e-mail:** 4648800@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

MANAGEMENT OF INNOVATIVE PROJECTS AND PRODUCTS IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION AND TURBULENT ENVIRONMENT

Abstract. Managing innovative projects and products in a turbulent environment characterized by the BANI (Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible) framework is extremely relevant for Ukraine. Full-scale war, economic instability, infrastructure disruptions with a probability of power outages of 0.6–0.7 and the migration of 6 million displaced persons create a complex environment where traditional project management models lose their effectiveness due to their inflexibility. At the same time, innovation is the key to Ukraine's recovery, competitiveness and integration into the global innovation space. A value-based approach that takes into account social, economic, environmental, technological and ethical aspects becomes necessary for proactive risk management and maximizing opportunities in such conditions. The relevance of the research is enhanced by the need for adaptive tools that allow turning uncertainty into competitive advantage, especially in the context of the rapid development of technologies such as artificial intelligence (AI) and Building Information Modelling (BIM). The product of the research is a model of risk and opportunity management of innovative projects and products in a turbulent environment, based on a value system and a value approach. The model integrates AI for risk and demand forecasting, BIM for modelling, and IoT for real-time monitoring. Multi-criteria analysis of values in the areas of social, economic, environmental, technological, and ethical, with weighting factors for determining priorities. Scenario planning and Agile approaches for adapting to uncertainty. The research process included studying the turbulent environment of Ukraine (war, economic crisis) and its impact on innovative projects, defining a value approach as a basis for management, with an emphasis on social, economic and environmental values. Integration of AI based on forecasting, BIM for modelling and scenario planning into a single system focused on maximising value. It has been proven that the value approach, combined with AI and BIM, increases the adaptability of projects in the BANI environment, thereby reducing risks and opening up new opportunities. The study confirms that the risk and opportunity management model based on the value approach is an effective tool for innovative projects in a turbulent environment. It allows not only to minimize the negative impact of uncertainty but also to create additional value, contributing to economic, environmental and social development. Examples from Kyiv demonstrate how the synergy of technology, ecology and social needs transforms challenges into opportunities.

Keywords: management, innovative projects, products, artificial intelligence, BANI environment.

Н.С. Бушуєва, Є.А. Лобок, Г.А. Мурованський

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

УПРАВЛІННЯ ІННОВАЦІЙНИМИ ПРОЄКТАМИ ТА ПРОДУКТАМИ В УМОВАХ ДИГІТАЛІЗАЦІЇ ТА ТУРБУЛЕНТНОГО ОТОЧЕННЯ

Анотація. *Управління інноваційними проєктами та продуктами в умовах турбулентного оточення, що характеризується фреймворком BANI (Brittle, Anxious, Nonlinear, Incomprehensible), є надзвичайно актуальним для України. Повномасштабна війна, економічна нестабільність, інфраструктурні перебої з ймовірністю відключень енергії 0,6–0,7 та міграцією 6 млн переселенців створюють складне середовище, де традиційні моделі управління проєктами втрачають ефективність через свою негнучкість. Водночас інновації є ключем до відновлення, конкурентоспроможності та інтеграції України у глобальний інноваційний простір. Ціннісний підхід, що враховує соціальні, економічні, екологічні, технологічні та етичні аспекти, стає необхідним для проактивного управління ризиками та максимізації можливостей у таких умовах. Актуальність дослідження підсилюється потребою в адаптивних інструментах, які дозволяють перетворити невизначеність на конкурентну перевагу, особливо в контексті швидкого розвитку технологій, таких як штучний інтелект (ШІ) та Building Information Modeling (BIM). Продуктом дослідження є модель управління ризиками та можливостями інноваційних проєктів і продуктів у турбулентному оточенні, заснована на системі цінностей і ціннісному підході. Модель інтегрує: ШІ для прогнозування ризиків і попиту, BIM для моделювання, IoT для моніторингу в реальному часі. Багатокритеріальний аналіз цінностей в напрямках: соціальний, економічний, екологічний, технологічний, етичний з ваговими коефіцієнтами для визначення пріоритетів. Сценарне планування та Agile-підходи для адаптації до невизначеності. Процес дослідження включав вивчення турбулентного оточення України (війна, економічна криза) та його впливу на інноваційні проєкти, визначення ціннісного підходу як основи для управління, з акцентом на соціальні, економічні та екологічні цінності. Інтеграція ШІ на основі прогнозування, BIM для моделювання і сценарного планування в єдину систему, орієнтовану на максимізацію цінності. Доведено, що ціннісний підхід у поєднанні з ШІ та BIM підвищує адаптивність проєктів у BANI-оточенні, знижуючи ризики та відкриваючи можливості. Дослідження підтверджує, що модель управління ризиками та можливостями на основі ціннісного підходу є ефективним інструментом для інноваційних проєктів у турбулентному оточенні. Вона дозволяє не лише мінімізувати негативний вплив невизначеності, але й створювати додаткову цінність, сприяючи економічному, екологічному та соціальному розвитку. Приклади Києва демонструють, як синергія технологій, екології та соціальних потреб трансформує виклики в можливості.*

Ключові слова: управління, інноваційні проєкти, продукти, штучний інтелект, BANI-оточення.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.101-109>

Вступ

Сучасний світ характеризується високим рівнем нестабільності та непередбачуваності, що особливо відчутно в умовах турбулентного оточення, яке описується фреймворком BANI (Brittle, Anxious, Nonlinear,

Incomprehensible). В Україні ці виклики посилюються повномасштабною війною, економічною нестабільністю, міграцією та перебоями в інфраструктурі. У таких умовах управління інноваційними проектами та продуктами вимагає не лише технологічної адаптивності, але й стратегічного підходу до балансування ризиків і можливостей. Інновації, як ключовий двигун прогресу, стають основою для відновлення та конкурентоспроможності, проте їхня реалізація ускладнена невизначеністю та обмеженими ресурсами.

Традиційні моделі управління проектами часто виявляються недостатньо гнучкими для роботи в турбулентному оточенні, де швидкі зміни та хаотичність переважають над стабільністю. У цьому контексті ціннісний підхід набуває особливого значення, оскільки він дозволяє зосередитися на створенні цінності для всіх зацікавлених сторін – від інвесторів і розробників до кінцевих користувачів і суспільства загалом. Система цінностей, що включає соціальні, економічні, екологічні, технологічні та етичні аспекти, стає основою для оцінки ризиків і можливостей, а також для прийняття обґрунтованих рішень у процесі реалізації інноваційних проєктів.

Ця стаття пропонує нову модель управління ризиками та можливостями інноваційних проєктів і продуктів, яка застосовує ціннісний підхід у турбулентному оточенні. Модель інтегрує передові технології, такі як штучний інтелект (ШІ) для прогнозування (80–85% точність), Building Information Modeling (BIM) для моделювання (95% точність) та сценарне планування для адаптації до невизначеності. Вона спрямована на максимізацію цінності проєктів через проактивне управління, враховуючи специфіку України – від необхідності швидкого відновлення до інтеграції у глобальний інноваційний простір. На прикладах девелоперських проєктів у Києві, таких як ЖК «Файна Таун» і транспортний хаб на Лівому березі, буде продемонстровано, як модель сприяє синергії між технологіями, екологією та соціальними потребами, забезпечуючи стійкість і ефективність в умовах кризи.

Метою дослідження є створення універсальної та адаптивної моделі, яка не лише знижує ризики (наприклад, затримки на 2–3 місяці чи перевитрати на 25–30%), але й відкриває можливості для економії (15–20%), підвищення якості життя та залучення інвестицій (потенціал \$5–10 млн від донорів). Стаття підкреслює, що ціннісний підхід у поєднанні з інноваційними інструментами є ключем до трансформації турбулентності в конкурентну перевагу, пропонуючи практичні рекомендації для менеджерів, інвесторів і політиків.

1. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розвиток загального штучного інтелекту трансформує управління проєктами, що вимагає еволюції компетенцій. Оскільки ШІ стає все більш інтегрованим в управління проєктами, компетенції, необхідні для ефективного управління, зміщуються від традиційних навичок до тих, які підкреслюють адаптивність, гнучкість і стратегічну інтеграцію технологій.

Розглянемо ключові компетенції, що розвиваються.

Спритність і адаптивність. Керівники проєктів повинні сприймати гнучкість як міру ефективності, зосереджуючись на швидких змінах планування проєкту та активному залученні клієнтів, щоб впоратися з динамічними проблемами, які створює ШІ [2, 7]. Це включає в себе адаптацію до нових методів управління та технологій для підвищення продуктивності проєкту [7, 9].

Лідерство та стратегічний менеджмент. Лідерські здібності залишаються вирішальними, особливо в управлінні складністю проєкту та інтеграції ІІІ в робочі процеси проєкту. Ефективне керівництво може пом'якшити негативний вплив складності проєкту та підвищити ефективність за допомогою гнучких практик [3, 4].

Технологічна майстерність. Оскільки технології ІІІ стають все більш поширеними, менеджерам проєктів необхідно розвивати компетенції в нових технологіях і цифрових стратегіях. Це включає розуміння та впровадження цифрових трансформацій і автоматизацію процесів для інтелектуального прийняття рішень [9].

Навички співпраці та інтеграції. Перехід до спільної відповідальності в управлінні проєктами підкреслює важливість колективних компетенцій. Менеджери повинні зосередитися на інтеграції індивідуальних, колективних та організаційних компетенцій для ефективного управління проєктами в середовищі, керованому ІІІ [1, 5].

Стійкість та етичні міркування. З огляду на потенційний вплив ІІІ на сталість, менеджери проєктів повинні розвивати компетенції в управлінні сталими проєктами, гарантуючи, що проєкти відповідають етичним стандартам і цілям сталого розвитку [6, 8].

Експоненціальне зростання ІІІ змінює компетенції з управління проєктами, наголошуючи на гнучкості, лідерстві, технологічному досвіді та стійкості. Керівники проєктів повинні адаптуватися до цих змін, розвиваючи навички, які інтегрують ІІІ в процеси проєкту, забезпечуючи успішні результати проєкту в технологічному середовищі, що швидко розвивається.

2. Математична модель для управління ризиками та можливостями інноваційних проєктів

Математична модель для управління ризиками та можливостями інноваційних проєктів і продуктів у турбулентному оточенні застосовує систему цінностей та ціннісний підхід. Модель базується на оцінці ймовірностей, впливу ризиків і можливостей, а також їхньої інтеграції в загальну функцію оптимізації. Вона враховує нестабільність, характерну для такого середовища, і пропонує кількісний підхід до прийняття рішень.

Розглянемо основні припущення моделі.

Турбулентне оточення характеризується високою невизначеністю, що впливає на ймовірність настання ризиків Pr та можливостей Po .

Ризики R та можливості O мають як позитивний, так і негативний вплив I на проєкт, вимірюваний у фінансових чи якісних одиницях.

Управління спрямоване на максимізацію загальної цінності проєкту V через балансування ризиків і можливостей.

Визначимо елементи моделі.

Ризики R .

R_i – i -й ризик ($i=1,2,...,n$).

P_{ri} – ймовірність настання ризику $0 \leq P_{ri} \leq 1$.

I_{ri} – вплив ризику (негативний, $I_{ri} < 0$).

Можливості O .

O_j – j -я можливість ($j=1,2,...,m$).

P_{oj} – ймовірність реалізації можливості $0 \leq P_{oj} \leq 1$.

I_{oj} – вплив можливості (позитивний, $I_{oj} > 0$).

Ресурси С.

C_k – доступні ресурси для управління ($k=1,2,...,l$, наприклад, бюджет, час, персонал).

C_{ri} – ресурси, необхідні для мінімізації i -го ризику.

C_{oj} – ресурси, необхідні для реалізації j -ї можливості.

Загальна цінність проєкту V .

Визначимо цільову функцію, що враховує сукупний вплив ризиків і можливостей.

1. *Оцінка ризиків і можливостей.* Очікуваний вплив кожного ризику та можливості розраховується як добуток ймовірності на величину впливу:

Очікуваний вплив ризику – $E(R_i) = P_{ri} \cdot I_{ri}$.

Очікуваний вплив можливості – $E(O_j) = P_{oj} \cdot I_{oj}$.

Загальний очікуваний вплив E проєкту:

$$E = \sum_{i=1}^n E(R_i) + \sum_{j=1}^m E(O_j) + \sum_{i=1}^n P_{ri} \times I_{ri} + \sum_{j=1}^m P_{oj} \times I_{oj} \quad (1)$$

2. *Цільова функція.* Загальна цінність проєкту (V) залежить від балансу між ризиками та можливостями з урахуванням витрат на їх управління:

$$V = \sum_{j=1}^m P_{oj} \times I_{oj} \times x_j + \sum_{i=1}^n P_{ri} \times |I_{ri}| \times (1 - y_i) - \sum_{j=1}^m C_{oj} \times x_j - \sum_{i=1}^n C_{ri} \times y_i \quad (2)$$

де: x_j – бінарна змінна (1, якщо можливість O_j реалізується, 0 – якщо ні).

y_i – бінарна змінна (1, якщо ризик R_i мінімізується, 0 – якщо ні).

$|I_{ri}|$ – абсолютне значення впливу ризику, оскільки $I_{ri} < 0$.

Мета – максимізувати V .

3. *Обмеження.* Ресурсні обмеження:

$$\sum_{i=1}^n C_{ri} \times y_i + \sum_{j=1}^m C_{oj} \times x_j \leq C_{total} \quad (3)$$

де C_{total} – загальний доступний бюджет.

Ймовірності в турбулентному оточенні. Ймовірності P_{ri} та P_{oj} можуть варіюватися в межах інтервалу через невизначеність:

$$P_{ri} \in [P_{ri}^{min}, P_{ri}^{max}], \quad (4)$$

$$P_{oj} \in [P_{oj}^{min}, P_{oj}^{max}]. \quad (5)$$

Бінарні змінні $x_j, y_i \in \{0, 1\}$.

4. *Управління невизначеністю.* Для врахування турбулентності вводимо коефіцієнт невизначеності (σ), який коригує ймовірності:

$$P_{ri}' = P_{ri} + \sigma \cdot \Delta P_{ri}, \quad (6)$$

$P_{oj}' = P_{oj} - \sigma \cdot \Delta P_{oj}$, де ΔP – максимальне відхилення ймовірності, а $\sigma \in [0, 1]$ залежить від рівня турбулентності (наприклад, $\sigma = 0.8$ у кризових умовах).

Розглянемо приклад застосування моделі.

Припустимо, інноваційний проєкт має 2 ризики та 2 можливості.

R_1 затримка поставок $P_{r1} = 0.6$, $I_{r1} = -10,000$ USD, $C_{r1} = 2,000$ USD.

R_2 технічний збій $P_{r2} = 0.4$, $I_{r2} = -15,000$ USD, $C_{r2} = 3,000$ USD.

O_1 залучення інвестора $P_{o1} = 0.7$, $I_{o1} = 20,000$ USD, $C_{o1} = 1,500$ USD.

O_2 новий ринок $P_{o2} = 0.5$, $I_{o2} = 25,000$ USD, $C_{o2} = 2,500$ USD).

$C_{total}=7,000 \text{ USD}, \sigma=0.5, \Delta P=0.2.$

Скоригуємо ймовірності.

$P_{r1}'=0.6+0.5 \cdot 0.2=0.7,$

$P_{r2}'=0.4+0.5 \cdot 0.2=0.5,$

$P_{o1}'=0.7-0.5 \cdot 0.2=0.6,$

$P_{o2}'=0.5-0.5 \cdot 0.2=0.4.$

Виконаємо оптимізацію цінностей V .

Максимізуємо V за умов обмеженого бюджету, обираючи x_j і y_i .

Припустимо, обираємо $y_1=1$ (усуваємо R_1), $y_2=0$, $x_1=1$ (реалізуємо O_1), $x_2=0$.

$V=(0.6 \cdot 20,000 \cdot 1)-(0.7 \cdot 10,000 \cdot 0)-(0.5 \cdot 15,000 \cdot 1)-(1,500 \cdot 1)-(2,000 \cdot 1)-(0)=$
 $=12,000-7,500-1,500-2,000=1,000 \text{ USD}.$

Модель дозволяє кількісно оцінити вплив ризиків і можливостей, оптимізувати ресурси та врахувати турбулентність через коригування ймовірностей. Вона є інструментом для прийняття рішень, який допомагає максимізувати цінність проєкту в умовах нестабільності. Для практичного застосування можна інтегрувати модель із ІІІ для прогнозування P та I . Модель забезпечує синергію, у проєкті «Файна Таун» – економія \$5–7 млн, енергоефективність – 30%, житло для 5,000 сімей; у транспортному хабі – зниження викидів на 20%, сполучення для 1 млн осіб, економія – \$3 млн.

3. Застосування моделі для аналізу ризиків та можливостей проєкту ЖК «Файна Таун»

Проєкт поквартальної забудови 57 будинків, на території 40 га, з вартістю \$100 млн, який планується до завершення у 2026 році.

Проведемо аналіз ризиків проєкту. Результати аналізу наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Таблиця ризиків реалізації девелоперського проєкту ЖК «Файна Таун»

Ризик	Ймовірність	Вплив	Опис	Проактивні заходи
Перебої енергопостачання	0,6	Високий (8/10)	Затримки будівництва на 2–3 місяці через відключення	IoT-моніторинг + ІІІ-адаптація графіків (85% ефективність), резервні генератори
Інфляція та зростання цін	0,8	Середній (6/10)	Зростання витрат на \$10 млн через ціни на матеріали (+25–30%)	ІІІ-прогнозування (80% точність), закупівля матеріалів заздалегідь (-10% витрат)
Зміна попиту	0,7	Середній (5/10)	Перехід із бізнес-класу (30%) на економ-клас (50%)	Сценарне планування, ІІІ-аналіз попиту (50% економ-клас), коригування планів
Брак кваліфікованих кадрів	0,5	Середній (6/10)	Лише 10–20% спеціалістів із BIM-досвідом	Навчання (\$50,000), залучення віддалених експертів
Регуляторні затримки	0,4	Низький (4/10)	Бюрократія у дозволах (1–2 місяці затримки)	Проактивна співпраця з владою, цифрова документація

Аналіз можливостей проєкту наведено у таблиці 2.

Таблиця 2. Таблиця можливостей реалізації девелоперського проєкту ЖК «Файна Таун»

Можливість	Ймовірність	Вплив	Опис	Проактивні заходи
Енерго-ефективність	0,9	Високий (9/10)	Економія 30% на опаленні завдяки розумним системам	ВІМ-моделювання (95% точність), IoT-лічильники, утеплення будинків
Розумні продукти	0,8	Високий (8/10)	Smart-вулиці, IoT-освітлення (+25% вартості проєкту)	Інтеграція IoT+ШІ, маркетинг розумних рішень
Соціальна цінність	0,9	Середній (7/10)	Житло для 15,000 осіб, комфортне середовище	Розширення інфраструктури (променад 3 км, басейни), залучення громади
Зростання попиту на комфорт-клас	0,6	Середній (6/10)	Попит на закриті квартали з інфраструктурою	ШІ-аналіз трендів, акцент на безпеку (відеонагляд), благоустрій (12 га)
Економія на технологіях	0,7	Середній (5/10)	Зниження витрат на 15–20% (\$5–7 млн) через ШІ та ВІМ	Оптимізація логістики ШІ (-12%), ВІМ для проєктування (-15% помилок)

Ці таблиці демонструють, як проактивне управління балансує ризики та можливості в турбулентному оточенні Києва, підвищуючи ефективність до 85–90%.

Висновки

Необхідність адаптивного підходу в турбулентному оточенні. Турбулентне середовище України, позначене війною, економічною нестабільністю та перебоями в інфраструктурі, вимагає від управління інноваційними проєктами гнучкості й проактивності. Традиційні моделі виявилися недостатньо ефективними через їхню орієнтацію на стабільність, тоді як запропонована модель, заснована на ціннісному підході, дозволяє адаптуватися до умов BANI, перетворюючи невизначеність на можливості.

Ефективність ціннісного підходу. Застосування системи цінностей (соціальних, економічних, екологічних, технологічних, етичних) як основи управління забезпечує комплексну оцінку ризиків і можливостей. Ціннісний підхід фокусується на створенні цінності для всіх зацікавлених сторін, що сприяє не лише економічній вигоді з ROI до 20%, але й соціальному (житло для 15 000 осіб у «Файна Таун») та екологічному (зниження викидів на 20% у транспортному хабі) прогресу, формуючи стійке рішення в умовах кризи.

Роль технологій у синергії. Інтеграція штучного інтелекту з точністю прогнозування 80–85%, Building Information Modeling (BIM) з точністю моделювання 95% та Інтернету речей (IoT) для моніторингу в реальному часі створює синергію, що перевищує ефект від окремих інструментів. У «Файна Таун» це проявилось в економії \$5–7 млн і скороченні термінів (з 18 до 15 місяців), а в транспортному хабі – у зниженні заторів на 12% і викидів на 20%, демонструючи, як технології підсилюють одна одну.

Практична результативність моделі. На прикладі девелоперських проєктів у Києві модель довела свою здатність знижувати ризики (затримки на 2–3 місяці, перевитрати на 25–30%) та максимізувати можливості (економія 15–20%, залучення \$5–10 млн від донорів). Ефективність проєктів сягає 85–90%, що підтверджує її застосовність у реальних умовах. Синергія між технологіями, екологією (енергоефективність 30%) та соціальними потребами (сполучення для 1 млн осіб) створює додаткову цінність, перевищуючи суму окремих досягнень.

Універсальність і адаптивність. Модель є універсальним інструментом, який можна масштабувати на інші сектори (енергетика, логістика) та міста України (Харків, Одеса). Її адаптивність забезпечується проактивними методами, такими як сценарне планування та Agile, що враховують невизначеність (перебої логістики 0,7) і дозволяють швидко реагувати на зміни, зберігаючи фокус на цінності.

Соціально-економічний вплив. Успішна реалізація моделі сприяє не лише економічному відновленню (зростання конкурентоспроможності), але й підвищенню якості життя (житло, транспорт) та екологічній стійкості (переробка 70% відходів). Це робить її стратегічно важливою для інтеграції України у глобальний інноваційний простір, залучаючи міжнародні інвестиції та зміцнюючи репутацію.

Перспективи вдосконалення. Для подальшого розвитку моделі необхідно інвестувати в підготовку кадрів (10–20% із досвідом III/BIM), розширювати бази даних (2TB+ для аналізу) та розробляти етичні рамки для використання технологій. Це забезпечить її довгострокову ефективність і відповідність глобальним стандартам.

Запропонована модель управління ризиками та можливостями інноваційних проєктів і продуктів на основі ціннісного підходу є дієвим інструментом для роботи в турбулентному оточенні. Вона дозволяє мінімізувати негативний вплив нестабільності, одночасно створюючи економічну, екологічну та соціальну цінність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Loufrani-Fedida, S., & Missonier, S. (2015). The project manager cannot be a hero anymore! Understanding critical competencies in project-based organizations from a multilevel approach. *International Journal of Project Management*, 33, 1220-1235. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2015.02.010>
2. Conforto, E., Amaral, D., Da Silva, S., Di Felippo, A., & Kamikawachi, D. (2016). The agility construct on project management theory. *International Journal of Project Management*, 34, 660-674. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2016.01.007>
3. Ahmed, R., Philbin, S., & Cheema, F. (2020). Systematic Literature Review of Project Manager's Leadership Competencies. ERN: Culture & Leadership (Topic). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3884750>

4. Li, Y., Sun, T., Shou, Y., & Sun, H. (2020). What Makes a Competent International Project Manager in Emerging and Developing Countries?. *Project Management Journal*, 51, 181-198. <https://doi.org/10.1177/8756972820901387>
5. Chen, T., Fu, M., Liu, R., Xu, X., Zhou, S., & Liu, B. (2019). How do project management competencies change within the project management career model in large Chinese construction companies?. *International Journal of Project Management*. <https://doi.org/10.1016/J.IJPROMAN.2018.12.002>
6. Irfan, M., Khan, S., Hassan, N., Hassan, M., Habib, M., Khan, S., & Khan, H. (2021). Role of Project Planning and Project Manager Competencies on Public Sector Project Success. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/SU13031421>
7. Muhammad, U., Nazir, T., Muhammad, N., Maqsoom, A., Nawab, S., Fatima, S., Shafi, K., & Butt, F. (2021). Impact of agile management on project performance: Evidence from I.T sector of Pakistan. *PLoS ONE*, 16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249311>
8. Yao, H., Fu, H., Lu, Y., Xu, P., & Wang, L. (2025). A role paradigm shift in project management: investigating the project manager competencies required by sustainable project management. *Engineering, Construction and Architectural Management*. <https://doi.org/10.1108/ecam-07-2024-0830>
9. Rodrigues, A., Oladimeji, O., Guedes, A., Chinelli, C., Haddad, A., & Soares, C. (2023). The Project Manager's Core Competencies in Smart Building Project Management. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings13081981>

Стаття надійшла до редакції 31.01.2025 і прийнята до друку після рецензування 25.04.2025

The article was received 31.01.2025 and was accepted after revision 25.04.2025

Бушусьва Наталія Сергіївна

д.т.н., професор кафедри управління проєктами, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4969-7879> **e-mail:** Natbush@ukr.net

Лобок Євген Анатольович

аспірант кафедри управління проєктами, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-9841-1132> **e-mail:** ownnereugene@gmail.com

Мурованський Глеб Анатолієвич

аспірант кафедри управління проєктами, Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: 03037, Україна, м. Київ, пр-т Повітряних Сил, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4610-9087> **e-mail:** 4648800@gmail.com

УДК 574.08:681.78:629.52.7

Oleg Mashkov¹, doctor of technical sciences

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9227-4647> **e-mail:** mashkov_oleg_52@ukr.net

Volodymyr Prisyazhny², candidate of technical sciences

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037> **e-mail:** ncuvkz@spacecenter.gov.ua

¹State Ecological Academy of Postgraduate Education and Management, Kyiv, Ukraine

²National Space Facilities Control and Testing Center, Kyiv, Ukraine

DECODERATION OF SATELLITE IMAGES OF WATER PROTECTION ZONES USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM

Abstract. *The work is devoted to the application of an artificial intelligence system to assess violations of the norms of environmental water protection strips along the Dnieper and several middle rivers in the Dnipropetrovsk region. The use of artificial intelligence allows you to form vector layers of agricultural fields located in the zone of water protection strips, as well as the field of the building line along the banks of rivers, elements of which violate the norms of the distance to water bodies.*

Diagnostics and forecasting of situations using aerospace technologies involves the use of a set of models of ecosystem objects in the intelligent system of environmental protection and territories with varying degrees of environmental threats to objects. This approach allows you to perform spatially distributed assessment of environmental risk and diagnostics of the ecological situation in ecosystems.

The methodology for applying aerospace technologies to solve environmental problems using an artificial intelligence system allows for the integration of environmental monitoring data from various observation sources: stationary observation points, ground-based mobile complexes, remotely piloted aircraft, and space-based remote sensing systems.

The use of aerospace technologies in environmental safety management using artificial intelligence systems involves the following stages: identification of risk factors, risk assessment, risk management in the ecosystem. Formalization of tasks in the field of environmental monitoring using artificial intelligent systems with the use of aerospace technologies takes into account: geology and subsoil resources (including groundwater), hydrology and surface water resources, forest resources and plant cover, impacts on the environment, wildlife, atmospheric air, precipitation and snow cover, communication facilities, agriculture, use and development of territories.

Keywords: *geographic information systems, remote sensing methods, environmental safety, regulatory distances, landfills of agricultural lands and buildings located within nature conservation water protection zones, nature conservation water protection zones, environmental protection technology, ecosystem.*

О.А. Машков¹, В.І. Присяжний²

¹Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, м. Київ, Україна

²Національний центр управління та випробувань космічних засобів, м. Київ, Україна

ДЕШИФРУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ ВОДОЗАХИСНИХ ПРИРОДООХОРОННИХ ЗОН З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. Робота присвячена застосуванню системи штучного інтелекту для оцінки порушень нормативу природоохоронних водозахисних смуг уздовж Дніпра і декількох середніх річок на території Дніпропетровської області. Застосування штучного інтелекту дозволяє сформувати векторні шари сільськогосподарських полів, розташованих в зоні водозахисних смуг, а також по лінії забудови вздовж берегів річок, елементи якої порушують нормативи відстані до водних об'єктів.

Діагностика та прогнозування ситуацій з використанням аерокосмічних технологій передбачає застосування з множини моделей об'єктів екосистеми в інтелектуальній системі захисту навколишнього середовища і території з різним ступенем екологічних загроз. Такий підхід дозволяє виконувати просторово-розподілену оцінку екологічного ризику та діагностику екологічної ситуації в екосистемах.

Застосування аерокосмічних технологій при управлінні екологічною безпекою за допомогою систем штучного інтелекту передбачає наступні етапи: ідентифікація факторів ризику, оцінка ризику, управління ризиком в екосистемі. Формалізація завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою штучних інтелектуальних систем із застосуванням аерокосмічних технологій враховує: геологію і ресурси надр (в т.ч. підземних вод), гідрологію і поверхневі водні ресурси, лісові ресурси і рослинний покрив, впливи на довкілля, тваринний світ, атмосферне повітря, атмосферні опади і сніговий покрив, комунікаційні об'єкти, сільське господарство, використання і розвиток територій.

Ключові слова: геоінформаційні системи, дистанційні методи, екологічна безпека, нормативні відстані, полігони сільськогосподарських угідь та будівель, що розташовані в межах природоохоронних водозахисних смуг, природоохоронні водозахисні смуги, технологія захисту навколишнього середовища, екосистема.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.110-120>

Вступ

Актуальність побудови та застосування інтелектуальної системи захисту навколишнього середовища з практичної точки зору полягає в обґрунтуванні можливості підвищити рівень екологічної безпеки регіону, з наукової – в необхідності використання під час проведення досліджень сучасного математичного апарату, заснованого, зокрема, на теорії штучного інтелекту.

Системне забезпечення екологічної безпеки держави передбачає визначення мети управління екологічною безпекою, створення належних умов для життя суспільства, функціонування техносфери, самовідтворення природного середовища. Системні управлінські рішення спрямовано на виконання наступних завдань: оцінка рівнів ризику настання тих чи інших надзвичайних ситуацій на конкретних територіях чи окремих об'єктах (має на

меті подальшу розробку заходів із зниження ризику до прийняттого рівня, розробку сценаріїв реагування на надзвичайні ситуації в разі їх настання); класифікація об'єктів підвищеної небезпеки відповідно до рівнів їх ризику.

Традиційний спосіб отримання інформації про стан навколишнього природного середовища і техногенних об'єктів, який здійснюється наземними службами, не завжди забезпечує необхідну оперативність оновлення даних. Застосування аерокосмічних технологій (знімків високої роздільної здатності та сучасних програмних засобів обробки), використання мобільних комплексів екологічного моніторингу дозволяють отримати інформацію про навколишнє середовище, прогнозувати розвиток екологічних процесів та створити систему підтримки прийняття управлінських екологічних рішень. Це дозволить підвищити рівень екологічної безпеки навколишнього середовища, водозахисних природоохоронних зон.

Створення та застосування інтелектуальної системи захисту навколишнього середовища за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням аерокосмічних технологій в умовах надзвичайних екологічних ситуацій в реальному часі, що заснована на динамічній оцінці екологічного ризику, є актуальною науково-прикладною проблемою, вирішенню якої присвячено дане дослідження. Оскільки методологія побудови інтелектуальної системи захисту навколишнього середовища за методом забезпечення функціональної стійкості екосистем з використанням аерокосмічних технологій в умовах надзвичайних екологічних ситуацій на сьогоднішній день розроблена недостатньо, а визначена проблема занадто далека від свого вичерпного рішення, в зв'язку з випадками надзвичайних ситуацій, що почастишали, вона набуває особливої актуальності.

Річка – найважливіший елемент навколишнього середовища, джерело питної і промислової води, природний водний шлях, постійно поновлюване джерело гідроенергії, місцеперебування риб та інших прісноводних організмів, а також водної рослинності, що робить необхідним дбати про чистоту і збереження здоров'я всіх водойм на Землі. Відповідно до закону, землі прибережних захисних смуг перебувають у державній та комунальній власності і можуть надаватися в користування лише для цілей, встановлених водним кодексом [8, 9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розвиток теорії і практичних питань створення систем управління екологічною безпекою навколишнього природного середовища зробили такі вчені, як Аверин Г.В., Белявський Г.О., Бондар О.І., Бугор А.Н., Бусигин Б.С., Ващенко В.М., Ємець М.А., Єрмаков В.М., Іващенко Т.Г., Лялько В.І., Машков О.А., Мокін В.Б., Петрук В.Г., Попов М.О., Рудько Г.І., Соколов Ю.М., Тарарико О.Г., Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Улицький О.А., Федоровський О.Д., Фролов В.Ф., Чумаченко С.М., Шапар А.Г., Шмандій В.М., Шматков Г.Г. та інші. Однак залишаються недостатньо висвітленими питання удосконалення підходів і методів, що поєднують теорію та практику створення інтегрованої автоматизованої системи для виконання завдань стратегічного екологічного оцінювання, оцінки впливу на довкілля, а також аналізу екологічних загроз і ризиків. У теперішній час гостро постали питання об'єднання інформаційно-логічних структур регіональних систем екологічного моніторингу, розроблення

способів та алгоритмів опрацювання моніторингової інформації та структури баз даних, визначення критеріїв комплексної оцінки стану навколишнього природного середовища. В Україні одними з провідних науковців у галузі космічних досліджень є: Лялько В.І. – спектральні характеристики рослинного покриву; Попов М.О. – прогнозування врожайності зернових культур за багатоспектральними даними дистанційного зондування Землі; Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д., Триснюк В.М. – космічний моніторинг забруднення землі; Шумейко В.О., Сметанін К.В., Панас Р.М. – космічний моніторинг деградації ґрунтів [1–7].

Мета роботи. Метою дослідження є створення методологічних основ побудови та застосування інтелектуальної системи захисту навколишнього середовища з використанням аерокосмічних технологій.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення екологічної безпеки навколишнього середовища з використанням аерокосмічних технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Верховна Рада України прийняла закон, що встановлює розміри і межі прибережних захисних смуг водойм і обмежує господарську діяльність в межах цих захисних смуг. Законом встановлюється, що з метою охорони поверхневих водних об'єктів від забруднення і засмічення, а також збереження водності вздовж річок, морів, навколо озер, водосховищ та інших водойм, в межах водоохоронних зон виділяються земельні ділянки під прибережні захисні смуги. Закон визначає, що такі захисні смуги навколо річок і водойм для малих річок, струмків, а також ставків площею менше 3 га встановлюються шириною 25 м.

Для середніх річок, водосховищ на них і ставків більше 3 га захисна смуга встановлюється шириною 50 м, для великих річок, водосховищ та озер – шириною 100 метрів. Прибережні захисні смуги встановлюються на земельних ділянках всіх категорій земель, крім земель морського транспорту. Відповідно до закону, землі прибережних захисних смуг перебувають у державній та комунальній власності і можуть надаватися в користування лише для цілей, встановлених водним кодексом.

Рада визначила також, що режим обмеженої господарської діяльності, передбачений для прибережних захисних смуг, встановлюється і на островах. Закон спрямований на упорядкування умов та режиму ведення господарської та інших видів діяльності в межах прибережної смуги способами, які дозволять запобігти або мінімізувати негативний вплив на водні ресурси [9–11].

До великих річок відносять річки, які протікають через кілька географічних зон і мають площу водозбору більше 50 тис. км². В Україні до цієї категорії великих річок відносять сім річок: Дунай, Дніпро, Тиса, Сіверський Донець, Десна, Дністер, Південний Буг. Середні річки протікають в межах однієї географічної зони; це річки з площею водозбору в межах від 2 до 50 тис. км². На території Дніпропетровської області до них належать такі річки, як Орель, Самара, Вовча, Гайчур, Мокра Сура, Інгулець, Базалук та інші [9, 10].

Малі річки – це ті річки, що не пересихають протягом року або пересихають на короткий час, протікають в рівнинній місцевості та мають площу водозбору менше 2 тис. км².

Найбільшою річкою України є річка Дніпро. В басейні Дніпра сконцентрований основний обсяг виробництва з переважанням "брудних" галузей промисловості (металургійна, хімічна, вугільна), найбільші енергетичні об'єкти та масиви зрошуваних земель. Найбільшими забруднювачами водних об'єктів басейну Дніпра є комунальне господарство, чорна та кольорова металургія, коксохімія, важке, енергетичне, транспортне машинобудування та сільське господарство. Дніпро на значних ділянках свого русла перетворений в каскади водосховищ, що також впливає на навколишнє середовище.

Ситуація в басейні Дніпра ускладнюється значним рівнем розвитку ерозійних процесів і руйнування берегів. Розораність території водозбору досягла 65%, а в Херсонській області і басейнах деяких малих річок – 80–85%, тоді як оптимальний рівень становить 40%. Лісистість території басейну в середньому досягає 14%, тоді як оптимальний рівень дорівнює 30%. Зростає площа еродованих земель. Продукти ерозії, потрапляючи у водні об'єкти, призводять до їх забруднення органічними сполуками, мінеральними добривами, зокрема поживними речовинами – азотом і фосфором, а також до замулення.

Малі річки басейну Дніпра, які становлять понад 90% річкової мережі басейну, несуть надзвичайне антропогенне навантаження. Висока розораність земель, надмірна насиченість їх просапними культурами, недостатня лісистість водозборів (в басейнах річок степової та лісостепової зон басейну Дніпра лісистість в 2–3 рази менше оптимального рівня) підсилюється ерозійними процесами, забрудненням і замуленням річок і водойм. Площа земель зі збереженим природним ландшафтом скрізь менше оптимальної. Ситуація ускладнюється тим, що берега і заплави річок в останні роки відведені під дачне будівництво, садівництво і городництво [11].

Використані дані супутника Landsat 8 за 2016 рік, сформована мозаїка території Дніпропетровської області, виконана класифікація даних з виділенням класу водних об'єктів і класу земель сільськогосподарського призначення. Виділені об'єкти класу сільськогосподарських земель, відстань від яких до класу водних об'єктів менше за нормативну (у середовищі Definiens Developer 7). З виділених об'єктів сформований векторний файл. Векторний шар надалі відкоригований на даних картографічного інтернет-сервісу Google шляхом інтерактивного аналізу та створення полігонів сільськогосподарських полів, що включають його об'єкти. Таким чином, сформований векторний файл полів, які розорані в межах водозахисних природоохоронних смуг. Сформовані відповідні shp-файли.

На території Дніпропетровської області виявлено 1094 порушень ведення господарської діяльності у береговій природоохоронній зоні. Види та кількість порушень наведені в таблиці 1 і детальніше в таблиці 2.

Протяжність порушень забудови у береговій природоохоронній зоні складає близько 181,763 км. В таблиці 3 наведені дані щодо протяжності порушень уздовж Дніпра і середніх річок на території Дніпропетровської області.

Таблиця 1

Вид порушення	Кількість порушень, поля	Кількість порушень, городи
Зона < 25 м біля малих річок, струмків і потоків, а також ставків площею менше 3 га	279	291
Зона < 50 м біля середніх річок, водосховищ на них і ставків площею більше 3 га	312	195
Зона < 100 м біля великих річок, водосховищ на них (Дніпро, Дніпродзержинське і Каховське водосховища на Дніпрі)	13	4

Таблиця 2

Вид водойми	< 25 м поля	< 25 м городи	< 50 м поля	< 50 м городи	< 100 м поля	< 100 м городи	Усього
велика річка Дніпро	20	23	5	5	13	4	70
середня річка Вовча	15	10	77	33	-	-	135
середня річка Базавлук	22	30	37	32	-	-	121
середня річка Мокра Сура	26	33	30	17	-	-	106
середня річка Саксагань	11	28	30	23	-	-	92
середня річка Інгулець	3	23	26	23	-	-	75
середня річка Самара	9	7	13	19	-	-	48
середня річка Орель	7	4	7	8	-	-	26
середня річка Гайчур	2	3	15	6	-	-	26
інше	164	130	72	29	-	-	395
Усього:	279	291	312	195	13	4	1094

Таблиця 3

Вид водойми	Протяжність порушень забудови, км
велика річка Дніпро	102,764
середня річка Вовча	11,343
середня річка Базавлук	3,788
середня річка Мокра Сура	11,747
середня річка Саксагань	4,803
середня річка Інгулець	10,177
середня річка Самара	32,952
середня річка Орель	3,713
середня річка Гайчур	0,476
Усього	181,763

В результаті вирішення завдань моніторингу в інтелектуальній системі захисту навколишнього середовища мають бути застосовані моделі, сукупність яких є моделлю екосистеми (району екологічного моніторингу) (рис. 1) як цілісного територіального утворення, що формується в тісному взаємозв'язку людей, природних і штучних об'єктів, які можуть перебувати під впливом процесів руйнівного характеру.

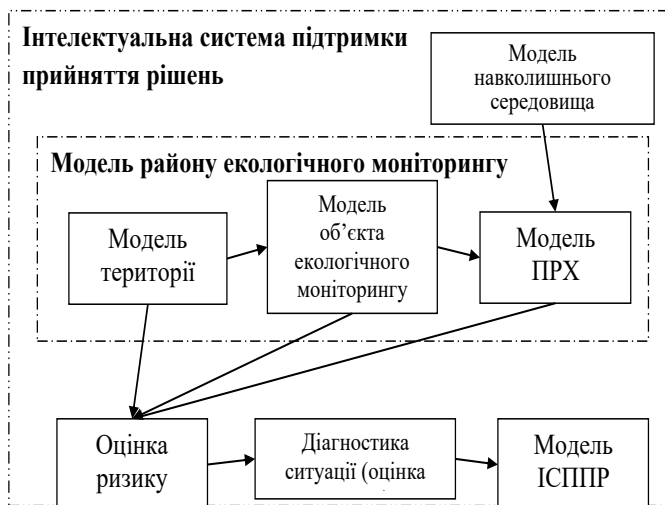


Рис. 1. Структура (модель) району екологічного моніторингу

Структурна схема інтелектуальної системи підтримки прийняття екологічних рішень системи має вигляд, наведений на рис. 2.



Рис. 2. Структурна схема інтелектуальної системи підтримки прийняття екологічних рішень системи

Ілюстраційні матеріали наведені на рисунках 3-5.



Рис. 3. Города розташовані менше ніж за 20 м від Дніпра (норматив відстані для великої ріки дорівнює 100 м)



Рис. 4. Старі Кодаки – менше ніж 30 м від Дніпра



Рис. 5. Житловий масив Придніпровський – менше ніж 30 м від Дніпра

Висновки

З застосуванням системи штучного інтелекту виконана робота по оцінці порушень нормативу природоохоронних водозахисних смуг уздовж Дніпра і декількох середніх річок на території Дніпропетровської області. Застосування штучного інтелекту дозволяє сформувати векторні шари сільськогосподарських полів, розташованих в зоні водозахисних смуг, а також по лінії забудови вздовж берегів річок, елементи якої порушують нормативи відстані до водних об'єктів.

Діагностика та прогнозування ситуацій з використанням аерокосмічних технологій передбачає застосування з множини моделей об'єктів екосистеми в інтелектуальній системі захисту навколишнього середовища і території з різним ступенем екологічних загроз. Такий підхід дозволяє виконувати просторово-розподілену оцінку екологічного ризику та діагностику екологічної ситуації в екосистемах.

Модель інтелектуальної системи захисту навколишнього середовища враховує формалізовані метапроцедури та дозволяє в будь-який момент часу прогнозувати екологічний стан екосистеми та оцінювати екологічні ризики для конкретних екологічних об'єктів при виникненні надзвичайних екологічних ситуацій в умовах ліміту часу.

Методика застосування аерокосмічних технологій для вирішення екологічних завдань системою штучного інтелекту дозволяє комплексувати дані екологічного моніторингу від різних джерел спостереження: стаціонарних пунктів спостереження, наземних мобільних комплексів, дистанційно пілотованих літальних апаратів, космічних систем ДДЗ.

Застосування аерокосмічних технологій при управлінні екологічною безпекою за допомогою систем штучного інтелекту передбачає наступні етапи: ідентифікація факторів ризику, оцінка ризику, управління ризиком в екосистемі. Формалізація завдань у сфері екологічного моніторингу за допомогою штучних інтелектуальних систем з застосуванням аерокосмічних технологій враховує: геологію і ресурси надр (в т.ч. підземних вод), гідрологію і поверхневі водні ресурси, лісові ресурси і рослинний покрив, впливи на довкілля, тваринний світ, атмосферне повітря, атмосферні опади і сніговий покрив, комунікаційні об'єкти, сільське господарство, використання і розвиток територій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013]. Mathematical and GIS-modeling of landslides in kharkiv region of Ukraine. Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347-352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду. Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: наук.-техн. журн. – Івано-Франківськ : Симфонія форте. – 2019. № 1. (19) 2019. С. 69–77. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Андреев С.М. Розробка картографічних моделей морських акваторій та прибережних територій з застосуванням геоінформаційних технологій / Андреев С.М., Крета Д.Л., Радчук В.В. // "Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій": матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. – Київ – Харків – АР Крим, 2008. – С. 112–117.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019]. Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. P. 61–67.
8. <https://delo.ua/ukraine/verhovnaja-rada-zapretila-stro-148398/>@delo.ua
9. <http://iportal.rada.gov.ua/ru/news/page/news/Novosty/Soobshchenyya/36927.html>
10. Law No. 2740-VI from 02.12.2010 “On Amendments to the Water and Land Codes of Ukraine Regarding Coastal Protection Stripes” (the draft law was registered under No. 2642)
11. Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine On the National Program for Environmental Improvement of the Dnieper Basin and Improvement of Drinking Water Quality, Kyiv, February 27, 1997, No. 123/97-VR.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2025 і прийнята до друку після рецензування 18.03.2025

REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klymenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 [in Ukrainian].
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., & Hlebuch, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. ISBN 978-617-7468-53-9 [in Ukrainian].
4. Mashkov, O.A., Trysnyuk, V.M., Mamchur, Y.V., Zhukauskas, S.V., Nigorodova, S.A., & Kurylo, A.V. (2019). A new approach to the synthesis of restorative control for remotely piloted aerial vehicles for environmental monitoring. *Environmental safety and balanced resource use: science and technology journal*, 1(19), 69-77 [in Ukrainian].
5. Andreyev, S.M., Kreta, D.L., & Radchuk, V.V. (2008). Development of cartographic models of marine areas and coastal areas using geoinformation technologies. In *"Modern information technologies for managing environmental safety, nature use, and emergency measures": materials of the VII int. scientific-practical conf.* (pp. 112-117). Kyiv – Kharkiv – AR Crimea.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., & Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Extended Abstracts.
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare UTPRESS ISSN 1582-0548*, 1, 61–67.
8. Retrieved from <https://delo.ua/ukraine/verhovnaja-rada-zapretila-stro-148398/©delo.ua>
9. Retrieved from <http://portal.rada.gov.ua/ru/news/page/news/Novosty/Soobshchenyya/36927.html>
10. Law no. 2740-VI from 02.12.2010 "On Amendments to the Water and Land Codes of Ukraine Regarding Coastal Protection Stripes" (the draft law was registered under No. 2642).
11. Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine On the National Program for Environmental Improvement of the Dnieper Basin and Improvement of Drinking Water Quality, Kyiv, February 27, 1997, No. 123/97-VR.

The article was received 02.01.2025 and was accepted after revision 18.03.2025

Машков Олег Альбертович

професор кафедри екологічної безпеки Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9227-4647> **e-mail:** mashkov_oleg_52@ukr.net

Присяжний Володимир Ілліч

Начальник Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Князів Острозьких, 8
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037> **e-mail:** ncuvkz@spacecenter.gov.ua

УДК 004.89:519.22

Oleksandr Trofymchuk, Dr.Sc., Professor, Corresponding Member of NASU, 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

Roman Koval, PhD student, Institute of Telecommunications and Global Information Space
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3821-3378> **e-mail:** roman.koval.science@gmail.com

Oleksii Zarudnyi, PhD student, Institute of Telecommunications and Global Information Space
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7462-3899> **e-mail:** oleksii.zarudnyi@gmail.com

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

METHODOLOGY FOR FORECASTING THE NUMBER OF DISABLED PEOPLE FROM SANITARY LOSSES

Abstract. *The article considers the problems of building mathematical models for predicting the contingent of pension recipients under conditions of uncertainty caused by the impact of hostilities. Based on the study of statistical information on the structure and dynamics of sanitary losses, an approach to revealing systemic uncertainty in the problem of predicting the contingent of pension recipients is proposed. This work is part of the study of the application of methods of intelligent data analysis and mathematical modeling in information technology intended for use in the pension system.*

The problem of predicting human losses as a result of hostilities is an urgent problem even in the conditions of the use of high-tech weapons. Sanitary and irretrievable losses are not only the effectiveness of the combat use of the unit, but also the costs of treatment, rehabilitation, pension provision, insurance payments. A high-intensity war with the use of the most modern weapons and military equipment has no analogues in retrospect. Therefore, approaches to predicting combat medical and non-recoverable losses, which are based solely on the calculation of average values or on analogies, cannot provide high-quality results. The study is devoted to the development of a methodology for predictive modeling of medical losses, the basis of which is probabilistic-statistical models in the form of Bayesian networks, the method of time series similarity and cluster analysis. If necessary, the proposed methodology can be used to perform calculations under different scenarios.

During the study, a number of numerical experiments were conducted, in which the correctness of the application of the proposed methodology was investigated. Acceptable forecasting results were obtained.

The proposals presented in the work will allow to increase the sustainability of the pension system of Ukraine, including by more accurately determining the dynamics of the contingent of pension recipients, and, accordingly, the costs of paying pensions.

Key words: *sanitary losses, rehabilitation, pension provision, modeling, Bayesian data analysis, classification.*

О.М. Трофимчук, Р.Г. Коваль, О.Б. Зарудний

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, м. Київ, Україна

МЕТОДИКА ПРОГНОЗУВАННЯ КІЛЬКОСТІ ІНВАЛІДІВ З ЧИСЛА САНІТАРНИХ ВТРАТ

***Анотація.** В статті розглянуті проблеми побудови математичних моделей для прогнозування контингенту одержувачів пенсій в умовах невизначеності, спричиненої впливом бойових дій. На основі дослідження статистичної інформації про структуру та динаміку санітарних втрат, запропоновано підхід до розкриття системної невизначеності у задачі прогнозування контингенту отримувачів пенсій. Дана робота є частиною дослідження застосування методів інтелектуального аналізу даних та математичного моделювання у інформаційній технології, призначений до використання у пенсійній системі.*

Проблема прогнозування людських втрат внаслідок бойових дій є актуальною проблемою навіть в умовах застосування високотехнологічного озброєння. Санітарні та безповоротні втрати – це не тільки ефективність бойового застосування підрозділу, а й витрати на лікування, реабілітацію, пенсійне забезпечення, страхові виплати. Війна великої інтенсивності із застосуванням найсучаснішого озброєння та військової техніки не має аналогів у ретроспективі. Тому, підходи до прогнозування бойових санітарних та безповоротних втрат, які базуються виключно на розрахунку середніх значень або на аналогіях, не можуть забезпечити отримання якісних результатів. Дослідження присвячене розробленню методики прогнозного моделювання санітарних втрат, основу якої становлять ймовірнісно-статистичні моделі у формі мереж Байєса, метод подібності часових рядів та кластерний аналіз. За потреби, запропонована методика може бути використана для виконання розрахунків за різних сценаріїв.

В ході дослідження було проведено ряд чисельних експериментів, в яких досліджено коректність застосування запропонованої методики. Отримано прийнятні результати прогнозування.

Пропозиції, представлені в роботі, дозволять підвищити стійкість пенсійної системи України, в тому числі, за рахунок більш точного визначення динаміки контингенту одержувачів пенсій і, відповідно, витрат на виплату пенсій.

***Ключові слова:** санітарні втрати, реабілітація, пенсійне забезпечення, моделювання, байєсівський аналіз даних, класифікація.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.121-135>

Вступ

Дослідження санітарних втрат – питання, важливе не лише для забезпечення поточної боєздатності військових формувань, а є складною проблемою, що охоплює національну економіку, оборонну та безпекову сфери, фінанси, соціальний захист та соціальне забезпечення. Найбільш розповсюдженими підходами щодо визначення санітарних втрат залишаються методи, ґрунтовані на використанні нормативних значень, коефіцієнтів, індикативних показників, експертних оцінок. Однак, такі методики не прийнятні для випадків, коли, наприклад, застосовується нове озброєння або методи ведення бою. Крім того, важливим є питання соціального захисту та соціального забезпечення всіх

постраждалих відповідно до їх потреб та протягом всього періоду, поки не зникне потреба, що значно збільшує видатки державного бюджету та Пенсійного фонду. Тому задача прогнозування кількості санітарних втрат та кількості осіб, що стануть інвалідами на середньо- та довгострокову перспективу є актуальною, потребує дослідження та опрацювання.

Аналіз існуючих підходів

Прогнозування санітарних втрат передбачає використання різних підходів, з урахуванням закономірностей та особливостей ведення бойових дій, характеру уражень, потенційного контингенту постраждалих тощо.

Для прогнозування втрат застосовують емпіричні моделі, з метою побудови яких використовують статистичні дані про кількість постраждалих у попередніх конфліктах. В таких моделях використовують коефіцієнти, наприклад коефіцієнт втрат на 1000 осіб для наступу чи оборони. Серед математичних моделей слід відзначити модель Ланчестера та стохастичні моделі [1-11]. Часто застосовують також імітаційні (симуляційні) моделі, які дозволяють наочно відобразити ситуацію певного бойового сценарію. Найпоширенішим способом оцінювання можливих втрат залишається метод експертних оцінок, хоча якість прогнозування, в даному випадку, повністю залежить від людського фактору – професійних знань та навичок експертів, їх об'єктивності та неупередженості.

Дослідивши вітчизняні та іноземні спеціалізовані джерела, інформацію з мережі Інтернет [1-11] щодо кількості та структури загальних втрат у різних війнах серед військовослужбовців, слід зазначити, що прогнозувати втрати лише на основі ретроспективних даних не доцільно, оскільки технологічний розвиток, наявність сучасних озброєнь, які мають значні вражаючі можливості, активне використання інформаційних технологій та штучного інтелекту зумовлюють складний, знищувальний характер бойових дій, який навіть у попередні 10-15 років не має аналогів [4-6]. Сучасна зброя стає також дедалі досконалішою. Навіть звичайні види озброєння стають більш потужними, а ураження ними більш масовими, крім того, з'являються нові види зброї, такі як лазерна, радіологічна, геофізична, галюциногенна тощо [4-6, 9, 10]. Все це зумовлює збільшення безповоротних та санітарних втрат, зростання тяжкості поранень, збільшення частки поранених з множинними пораненнями різних частин тіла, які згодом отримають інвалідність. Тобто, міняється не лише кількість, а й структура санітарних втрат. Тому важливо дослідити у короткостроковій перспективі потенційну кількість санітарних втрат, їх тяжкість, а у довгостроковій перспективі – ймовірну кількість інвалідів з числа санітарних втрат. У роботі М.О. Кудрицького, Н.В. Патер та В.О. Костиці [3] запропоновано алгоритм визначення бойових втрат особового складу на основі розрахунку коефіцієнтів збереження ефективності бойового застосування частини та методу експертних оцінок. Перевірка узгодженості і достовірності експертних оцінок здійснюється з використанням коефіцієнта конкордації Кендалла.

Перспективним напрямом досліджень військових конфліктів, як зазначають фахівці, роботи яких представлені у Military Operations Research [12], є використання ймовірісно-статистичних моделей у формі мереж Байєса. Мережа Байєса надає [13] можливість встановити причинно-наслідкові

зв'язки між подіями та оцінити ймовірності настання тієї чи іншої ситуації при отриманні нової інформації щодо зміни стану будь-якого вузла (змінної) мережі. Ступінь успішності застосування даного методу моделювання та формування статистичного висновку залежить від вміння коректно сформулювати постановку задачі, вибрати змінні процесу, які в достатній мірі характеризують його динаміку або статику, зібрати статистичні дані та використати їх для навчання мережі, а також коректно сформувати результат – висновок за допомогою побудованої мережі. Основною перевагою мереж Байєса є можливість одночасного врахування кількісних та якісних показників, динамічне надходження нової інформації, а також використання явної залежності між існуючими факторами, а також наочність моделювання. Ще однією перевагою застосування мереж Байєса є можливість врахування у моделі дискретних і неперервних змінних, врахування невизначеностей та практично відсутнє обмеження на кількість змінних. Мережі Байєса легко піддаються опису, мають гарні характеристики як інструмент для класифікації, не мають обмежень на закони розподілу змінних, на відміну від інших моделей на основі регресійних рівнянь, та не вимагають повноти інформації.

Тому у даному дослідженні використані саме мережі Байєса, оскільки вони надають можливість врахувати невизначеності статистичного, структурного і параметричного характеру, побудувати моделі за наявності прихованих вершин і при неповних спостереженнях, а також реалізувати формування ймовірнісного висновку за допомогою різних методів – наближених і точних.

Система прогнозування настання інвалідності серед санітарних втрат військ

Зростання кількості постраждалих, зокрема, з числа військовослужбовців, внаслідок активної фази військового конфлікту потребує значних матеріальних та грошових витрат. Тому актуальною проблемою є впровадження сучасних методів аналізу даних та ситуацій, прогнозування та підтримки прийняття рішень як у сфері національної безпеки та оборони, так і пов'язаних з нею сферах національного господарства, які б покращили планування витрат, запобігали б неоптимальному витрачання фінансових ресурсів держави. Впровадження цифровізації, використання штучного інтелекту, технологій обробки великих масивів даних (Big Data), тощо дає нові перспективи для розроблення відповідних систем підтримки прийняття рішень, основу яких складають сучасні інформаційні технології, математичні моделі, методи інтелектуального аналізу даних.

Запропонована інтелектуальна система підтримки прийняття рішень [13-15], структура якої представлена на рис. 1. Як видно з рис. 1, вона являє собою модульний програмний комплекс, призначений для опрацювання даних про санітарні втрати, та враховує специфіку предметної області [15-19].

Особливостями запропонованої системи є наявність серії підсистем для попередньої обробки та збору вхідних даних, оскільки дані про санітарні та безповоротні втрати можуть накопичуватися для обробки з різних систем, бути представленими в різних форматах, містити пропуски даних, аномальні значення. Основу системи становить аналітична підсистема, яка має модульну структуру та передбачає можливості її нарощування.

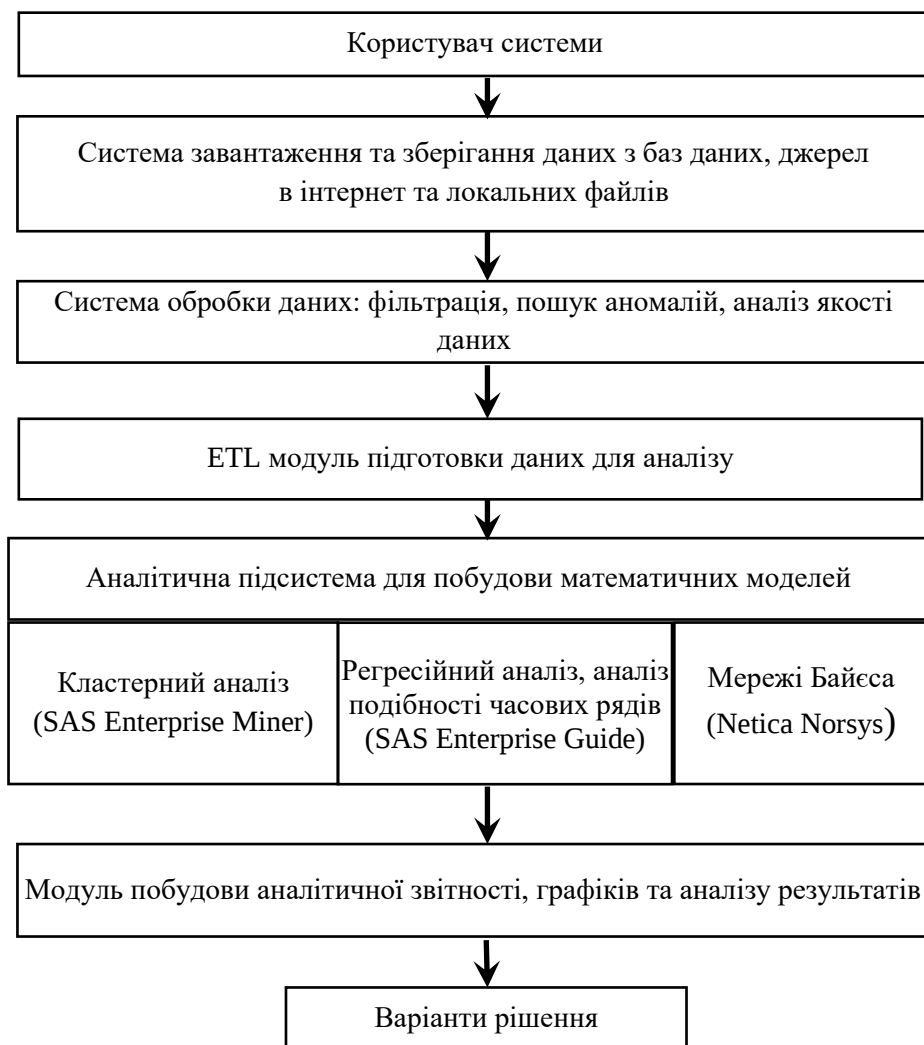


Рис. 1. Схема системи підтримки прийняття рішень

В даній роботі представлені модулі, які реалізують технологічний ланцюг, призначений для вирішення задачі прогнозування бойових санітарних та безповоротних втрат. Дана система може бути використана як доповнення до існуючих систем. У розробці використано програмне забезпечення SAS Enterprise Miner 14.1 та SAS Enterprise Guide [20, 21], що значно розширює набір інструментів аналітика за рахунок доповнення наявного програмного забезпечення новими моделями. Крім того, використання засобів компанії SAS дозволяє покращити візуалізацію результатів, представляти результати розрахунків у зручному для аналітики графічному чи табличному вигляді, за потреби, необхідні таблиці можуть бути вивантажені у зовнішні додатки, зокрема MS Excel.

Виходячи з наявної інформації щодо кількості втрат у період 2014-2019 рр. [3-6] у зоні АТО (рис. 2), було зроблено припущення стосовно співвідношення різних видів бойових втрат [3-6, 10].

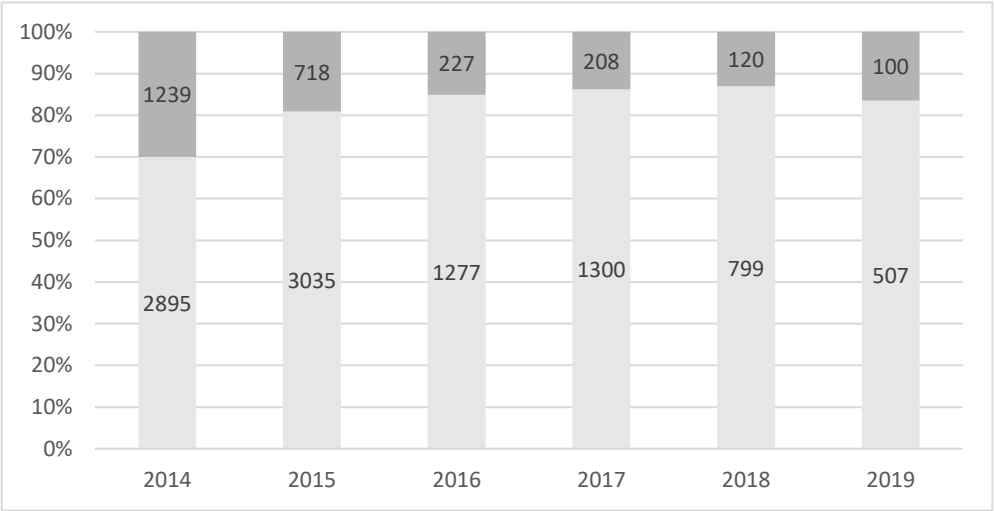


Рис. 2. Співвідношення бойових санітарних втрат (на діаграмі – світлий колір) і бойових безповоротних втрат (на діаграмі – темний колір)

Як видно з рис. 2, санітарні втрати становлять переважну більшість втрат, також слід зазначити, що їх кількість коливається залежно від інтенсивності та характеру бойових дій, захисту особового складу – найбільші безповоротні втрати були саме на початку АТО, коли ще не було напрацьовано бойового досвіду.

Фактори, вплив яких на кількість санітарних втрат, за даними експертів, є найсуттєвішим, представлені в таблицях 1-8. Вказані фактори й були розглянуті під час моделювання санітарних втрат.

Таблиця 1. Розподіл значень “Інтенсивність бою” (Battle intensity), для вершини мережі Байєса

Назва стану	Позначення стану в моделі	Значення ймовірності, %
Мала	Low	50
Середня	Medium	30
Висока	High	20

Таблиця 2. Розподіл значень “Тип зброї” (Weapon), для вершини мережі Байєса

Тип зброї	Позначення типу зброї в моделі	Значення ймовірності, %
Вогнепальна	Firearms	25
Боєприпаси об’ємного вибуху	Volatile Explosive Ammunition	25
Високоточна зброя	Precision Weapons	25
Запальні суміші	Incendiary Mixtures	25

Таблиця 3. Розподіл значень “Ступінь тяжкості поранення” (Injury), для вершини мережі Байєса

Ступінь тяжкості поранення	Позначення ступеня тяжкості поранення в моделі	Значення ймовірності, %
Легка	Easy	28,75
Середня	Medium	33,75
Важка	Heavy	18,75
Вкрай важка	Extremely difficult	18,75

Таблиця 4. Розподіл значень “Захист особового складу” (Personnel protection), для вершини МБ

Захист особового складу	Позначення захисту особового складу в моделі	Значення ймовірності, %
Повний (бронежилет, каска, захист кінцівок)	Full	40
Частковий (тільки бронежилет чи каска)	Partial	45
Відсутній (немає засобів індивідуального захисту)	None	15

Таблиця 5. Розподіл значень “Час евакуації” (Evacuation time), для вершини МБ

Час евакуації	Позначення часу евакуації в моделі	Значення ймовірності, %
Своєчасна (< = 1 година)	On time	30
Помірна (1-3 години)	Moderate	45
Запізно (> 3 годин)	Late	25

Вершина «Час евакуації» відображає, як швидко поранений військовослужбовець доставляється до місця кваліфікованої медичної допомоги. Вона впливає на результати (включаючи тяжкість санітарних втрат) і може приймати ймовірності, що ґрунтуються на реальних або передбачуваних логістичних умовах.

Таблиця 6. Розподіл значень “Медзабезпечення та логістика” (Medicine and logistic), для вершини МБ

Медзабезпечення та логістика	Позначення медзабезпечення та логістики в моделі	Значення ймовірності, %
Якісне	Good	35
Середнє	Average	45
Погане	Poor	20

«Медзабезпечення та логістика» представляє рівень доступності та якості медичної допомоги, включаючи наявність польових шпиталів, медикаментів, кваліфікованого персоналу, санітарної евакуації та постачання.

Таблиця 7. Розподіл значень “Характер ушкоджень” (Type Damage), для вершини МБ

Характер ушкоджень	Позначення характеру ушкоджень в моделі	Значення ймовірності, %
Голова	Head	32
Шия	Neck	1,24
Груди	Chest	8,94
Живіт	Abdomen	5,27
Таз	Pelvis	4,14
Хребет	Spine	1,14
Верхні кінцівки	Upper limbs	18,97
Нижні кінцівки	Lower limbs	28,3

Таблиця 8. Розподіл значень “Локалізація ушкоджень” (Localization), для вершини МБ

Локалізація ушкоджень	Позначення локалізації ушкоджень в моделі	Значення ймовірності, %
Ізольовані	Isolated	28,76
Множинні	Multiple	24,88
Поєднані	Combined	46,36

Таблиця 9. Розподіл значень “Санітарні втрати” (Sanitary losses), для вершини МБ

Санітарні втрати	Позначення санітарних ушкоджень в моделі	Значення ймовірності, %
Низькі (< 1,5 %)	Low	31,7
Середні (1,5 – 3 %)	Medium	32,5
Високі (3 – 5 %)	High	23,7
Критичні (> 5%)	Critical	12,1

На рис. 3 наведена топологія побудованої мережі Байєса.

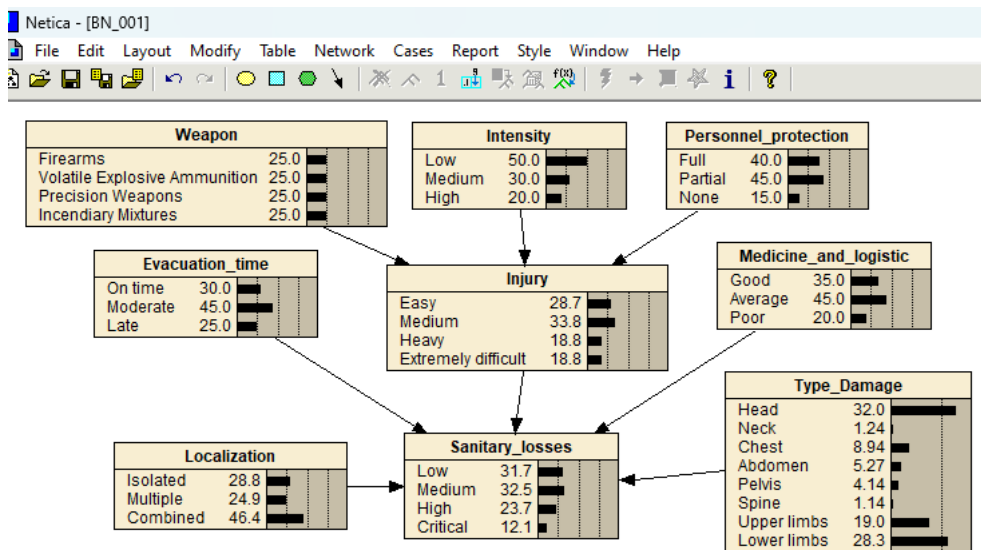


Рис. 3 Графічне представлення мережі Байєса для прогнозування ймовірності санітарних втрат

Використовуючи ймовірнісно-статистичні моделі, такі як представлено на рис. 3, можна розглянути декілька сценаріїв зміни кількості санітарних втрат (табл. 10).

Таблиця 10. Приклад сценаріїв моделювання із використанням наведеної мережі Байєса

Інтенсивність бою	Тривалість евакуації	Якість медичного забезпечення та логістики	Санітарні втрати, %			
			Низькі (< 1,5)	Середні (1,5 – 3)	Високі (3 – 5)	Критичні (> 5%)
Мала	Своєчасна	Якісне	75	20	5	0
Середня	Помірна	Середнє	30	45	20	5
Висока	Запізно	Погане	5	20	40	35
Середня	Запізно	Погане	10	30	40	20
Висока	Своєчасна	Якісне	20	45	25	10
Мала	Помірна	Середнє	50	35	12	3

Використовуючи результати сценарного аналізу, наведені у табл. 10, можна побачити, що за позитивного сценарію, коли мала інтенсивність бою, евакуація здійснюється вчасно, хороша якість медичного забезпечення та логістика, санітарні втрати будуть найменшими. За найнегативнішого з усіх представлених сценаріїв, найвища ймовірність зростання кількості санітарних втрат до високих і, навіть, критичних значень (рис. 4).

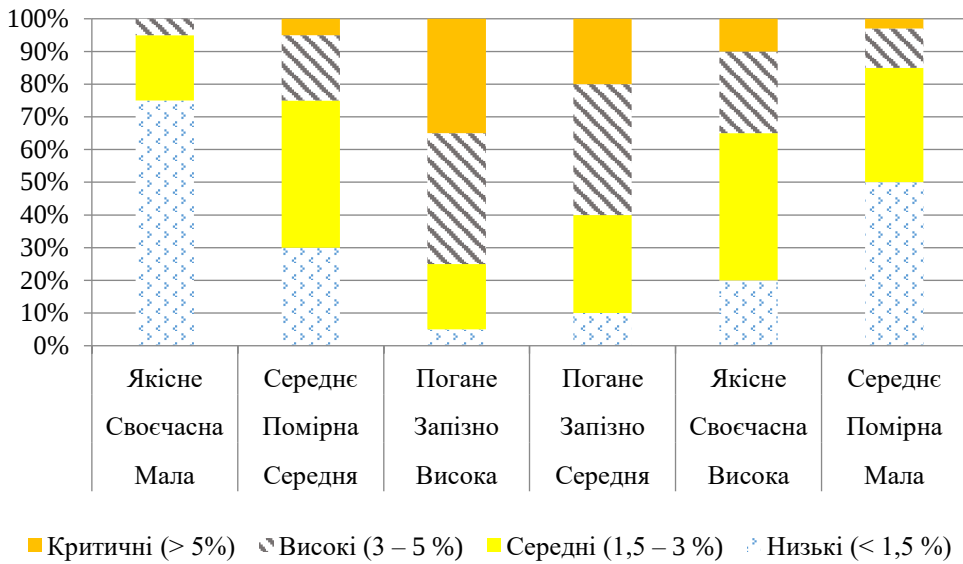


Рис. 4. Розподіл умовних ймовірностей санітарних втрат за різних умов конфлікту

Змодельовати ситуацію можна, додавши вершину, яка відображає ймовірність настання інвалідності.

На рис. 5 наведена топологія побудованої мережі Байєса, яка моделює ситуацію, за якої можлива інвалідність військового.

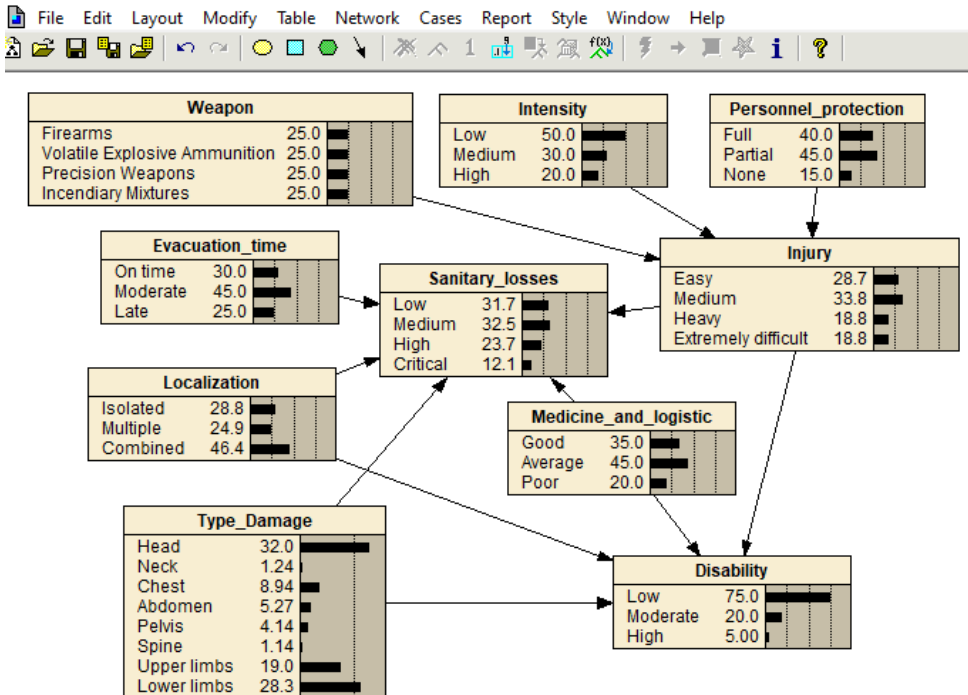


Рис. 5. Мережа Байєса для прогнозування ймовірності настання інвалідності

Таблиця 11. Розподіл значень “Ймовірність отримати інвалідність” (Disability), для вершини МБ

Ймовірність отримати інвалідність	Позначення ймовірності отримання інвалідності в моделі	Значення ймовірності, %
Низька ймовірність	Low	75
Помірна ймовірність	Moderate	20
Висока ймовірність	High	5

Опис станів вершини “Ймовірність отримати інвалідність”:

1) Низька ймовірність – як правило, це випадки, коли поранення не є критичними або особа має достатньо високий рівень медичного забезпечення, ефективний захист та швидку евакуацію.

2) Помірна ймовірність – зазвичай це серйозні поранення, але не критичні. Може бути затримка в евакуації або недостатня медична допомога, але шанс на повне відновлення залишається.

3) Висока ймовірність – коли поранення надзвичайно тяжкі, і ймовірність інвалідності дуже висока через серйозні ушкодження внутрішніх органів, ампутацію, тяжкі черепно-мозкові травми тощо. Окрім цього, дуже суттєво впливають проблеми з евакуацією або з медичним забезпеченням.

Таблиця 12. Результати моделювання із використанням пропонованої ймовірно-статистичної моделі – мережі Байєса

Локалізація ушкоджень	Медичне забезпечення та логістика	Тип ушкодження	Характер ушкоджень	Ймовірність отримати інвалідність
Ізольовані	Якісне	Легка	Верхні кінцівки	Низька
Множинні	Середнє	Середня	Живіт	Помірна
Поєднані	Погане	Вкрай важка	Голова	Висока
Ізольовані	Якісне	Легка	Верхні кінцівки	Низька
Множинні	Середнє	Середня	Живіт	Помірна
Поєднані	Погане	Важка	Голова	Висока
Множинні	Середнє	Важка	Нижні кінцівки	Помірна
Поєднані	Середнє	Вкрай важка	Хребет	Висока

В результаті моделювання отримано такі сценарії. Перший сценарій – легкі ушкодження (наприклад, пошкодження верхніх або нижніх кінцівок), швидке медичне забезпечення, ізольований і легкий тип ушкодження. У такому випадку ймовірність інвалідності буде низькою. Другий сценарій передбачає, що особа може отримати середні ушкодження, ізольовані або множинні

і висока ймовірність затримки медичної допомоги. За таких умов, ймовірність інвалідності зростає до помірного рівня. За третього сценарію, особа отримує вкрай тяжкі ушкодження (пошкодження голови або хребта), ситуація ускладнюється відсутністю швидкого надання медичної допомоги. В такому випадку ризик інвалідності дуже високий. Отже, як показали проведені чисельні експерименти, запропонований підхід може бути використаний для прогнозування санітарних втрат, і на основі отриманого прогнозу – кількості поранених, які з високою ймовірністю будуть інвалідами.

Отже, запропонована методика передбачає використання математичного моделювання та інтелектуального аналізу даних на основі байєсівського підходу для формування сценаріїв ситуацій, які потенційно можуть вимагати заходів додаткового економічного та фінансового впливу, розроблення імовірних сценаріїв розвитку ситуації на середньо- та довгострокову перспективу.

Як показує зарубіжний досвід, формування високого рівня національної безпеки і оборони України неможливе без функціонуючої надійної системи підтримки прийняття управлінських рішень, яка має бути багаторівневою з відкритою архітектурою, гнучкою та масштабованою, що забезпечить її здатність вчасно ідентифікувати нові загрози і виклики, оперативно опрацьовувати інформацію та надавати її зацікавленим споживачам для прийняття обґрунтованих та виважених рішень.

Висновки

1. У дослідженні розглянуто різні підходи до прогнозування кількості постраждалих внаслідок війни та санітарних втрат. Проаналізовано переваги й недоліки їх застосування у сучасних умовах. Для використання у пропонованій інтелектуальній системі підтримки прийняття рішень в якості основного інструменту прогнозування санітарних втрат обрано ймовірісно-статистичні моделі у формі мереж Байєса, перевагою яких є те, що вони не мають обмежень на закони розподілу змінних та не вимагають повноти інформації.

2. Особливістю даної розробки є те, що попередньо, з множини факторів, що впливають на кількість санітарних втрат, було відібрано найбільш значимі, використовуючи як статистичні дані поточної війни, так і дані попередніх конфліктів, визначивши закономірності досліджуваних процесів.

3. Сучасні озброєння та методика ведення бойових дій значно відрізняються від попередніх конфліктів. Озброєння стає все більш технологічним, тому кількість тяжких поранень з ускладненнями значно зростає. Відповідно, ймовірність настання інвалідності збільшується. Що в подальшому спричинятиме зростання витрат на соціальний захист та соціальне забезпечення осіб з інвалідністю.

4. В подальшому розробка буде доповнена модулем прогнозування видатків на соціальний захист та соціальне забезпечення інвалідів з числа військовослужбовців. Це дасть можливість планувати видатки та раціонально використовувати кошти державного бюджету і Пенсійного фонду України на соціальний захист та соціальне забезпечення, спрямовуючи їх на вирішення нагальних задач.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стандарт ВСТ 01.305.003-2019 (01) «Методичне забезпечення. Класифікація бойових уражень, небойових травм та захворювань у Збройних силах України».
2. Конфлікти, війни та соціальні трансформації епохи модерну: теорія, історія, сьогодення : матеріали XI Міжнародної наук.-практ. конф. (м. Київ, 12–13 червня 2023 р.) / укладачі П. В. Федорченко-Кутуєв, О. М. Казьмірова, О. М. Вольський та ін. Університетська книга, 2023.
3. Кудрицький М. О., Патер Н. В., Костриця В. О. (2024). Пропозиції щодо алгоритму визначення бойових втрат особового складу з метою прогнозування зміни ефективності бойового застосування озброєння та військової техніки. *Військово-технічний збірник*. №31. С. 44-50. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.44-51>
4. Лівінський В. Г. (2020). Санітарні втрати як індикативний показник діяльності медичної служби Збройних Сил України. Сучасні аспекти військової медицини. Т. 27, № 2. С. 62-75. <https://doi.org/10.32751/2310-4910-2020-27-28>
5. За якими принципами обліковують санітарні втрати? URL: <https://armyinform.com.ua/2020/01/14/za-yakymy-pryncypamy-oblikovuyut-sanitarni-vtraty/>
6. Кочін І. В. (2019). Аналіз загальних втрат серед військовослужбовців і населення при бойових діях і їх особливості. *Науковий огляд*. №5(100). С. 29-39. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.5.100.2019.177015>
7. The official site of Watson institute (Brown University). URL: <http://watson.brown.edu/>
8. Фурсенко Л. К., Черновол Н. М. (2020) Ланчестеровські моделі бойових дій. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, № 4(66). С. 85-91. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.12>
9. Уражаюча дія сучасної зброї і характеристика санітарних втрат. URL: <https://ppt-online.org/37598>
10. Офіційний сайт НАТО. URL: <http://www.nato.int/>
11. Global Terrorism Database Codebook: inclusion criteria and variables. (2019). USA: University of Maryland,. 65 p. URL: <https://www.start.umd.edu/gtd/>
12. Gallagher M., Sturgeon S., Finch B., Villongco F. (2022). Probabilistic Analysis of Complex Combat Scenarios. *Military Operations Research*. Vol. 27, No. 1. P. 87–106. URL: <https://www.jstor.org/stable/27116757>
13. Згуровський М. З., Бідюк П. І., Терентьев О. М., Просянкін-Жарова Т. І. (2015). Байєсівські мережі в системах підтримки прийняття рішень : навч. посіб. Київ : Едельвейс.
14. Трофимчук О., Бідюк П., Кожухівська О., Кожухівський А. (2015). Ймовірнісно-статистичні невизначеності в системах підтримки прийняття рішень. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. № 826. С. 237–248.
15. Довгий, С. О., Бідюк П. І., Трофимчук О. М. (2014). Системи підтримки прийняття рішень на основі статистично-ймовірнісних методів. Київ : Логос, 2014.
16. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. (2007). Основи системного аналізу. К.: Видавнича група BVH.
17. Sankoff D., Kruskal J. (1999). Time warps, string edits, and macromolecules: The theory and practice of sequence comparison. URL: <https://web.stanford.edu/group/cslipublications/cslipublications/site/1575862174.shtml>
18. Beyer W.A., Stein M.L., Smith T.F., Ulam S.M. (1974). A molecular-sequence metric and evolutionary trees / *Mathematical Biosciences*. Vol. 19. P. 9-25. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0025556474900285>
19. Wilbur W.I., Lipman D.I. (1983). Rapid similarity searches of nucleic acid and protein data banks. *Proceeding of the National Academy of Science of the USA*. Vol. 80. P. 726-730. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6572363/>

20. Schubert S., Lee T. (2011). Time Series Data Mining with SAS® Enterprise Miner // Proceedings of the SAS Global Forum 2011 Conference. SAS Institute Inc., Cary, NC, URL: <https://support.sas.com/resources/papers/proceedings11/160-2011.pdf>
21. Leonard M., Sloan J., Lee T., Elsheimer B. (2007). An Introduction to Similarity Analysis Using SAS // Proceedings of the SAS Global Forum 2007 Conference. SAS Institute Inc., Cary, NC, URL: <https://support.sas.com/rnd/app/ets/papers/similarityanalysis.pdf>

Стаття надійшла до редакції 14.02.2025 і прийнята до друку після рецензування 29.04.2025

REFERENCES

1. Standart VST 01.305.003-2019 (01) «Metodychne zabezpechennja. Klasyfikacija bojovyh urazhen', nebojovyh travm ta zahvorjuvan' u Zbrojnyh sylah Ukraïny» [in Ukrainian].
2. Fedorchenko-Kutujev, P. V., Kaz'mirova, O. M., & Vol's'kyj, O. M. (2023). Konflikty, vijny ta social'ni transformacii' epohy modernu: teorija, istorija, s'ogodennja : materialy XI Mizhnarodnoi' nauk.-prakt. konf. (Kyiv, 12–13 chervnja 2023 r.). Kyiv: Universytets'ka knyga [in Ukrainian].
3. Kudryc'kyj, M. O., Pater, N. V., Kostrycja, V. O. (2024). Propozycji' shhodo alorytmu vyznachennja bojovyh vtrat osobovogo skladu z metoju prognozuvannja zminy efektyvnosti bojovogo zastosuvannja ozbrojennja ta vijs'kovoi' tehniky. *Vijs'kovo-tehnichnyj zbirnyk*, 31, 44-50 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.31.2024.44-51>
4. Livins'kyj, V. G. (2020). Sanitarni vtraty jak indykatyvnyj pokaznyk dijal'nosti medychnoi' sluzhby Zbrojnyh Syl Ukraïny. *Suchasni aspekty vijs'kovoi' medycyny*, 27 (2), 62-75 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32751/2310-4910-2020-27-28>
5. Za jakymy pryncypamy oblikovujut' sanitarni vtraty? <https://armyinform.com.ua/2020/01/14/za-yakymy-pryncypamy-oblikovuyut-sanitarni-vtraty/>
6. Kochin, I. V. (2019). Analiz zagal'nyh vtrat sered vijs'kovosluzhbovciv i naselennja pry bojovyh dijah i i'h osoblyvosti. *Naukovyj ogljad*, 5(100), 29-39. <https://doi.org/10.22141/2224-0586.5.100.2019.177015>
7. The official site of Watson institute (Brown University). <http://watson.brown.edu/>
8. Fursenko, L. K., Chernovol, N. M. (2020). Lanchesterovs'ki modeli bojovyh dij. *Zbirnyk naukovykh prac' Harkivs'kogo nacional'nogo universytetu Povitrijanyh Syl*, 4(66), 85-91 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.30748/zhups.2020.66.12>
9. Urazhajucha dija suchasnoi' zbroi' i harakterystyka sanitarnykh vtrat. <https://ppt-online.org/37598> [in Ukrainian].
10. Official NATO website. <http://www.nato.int/>
11. Global Terrorism Database Codebook: inclusion criteria and variables. (2019). USA: University of Maryland. <https://www.start.umd.edu/gtd/>
12. Gallagher, M., Sturgeon, S., Finch, B., Villongco, F. (2022). Probabilistic Analysis of Complex Combat Scenarios. *Military Operations Research*, 27 (1), 87–106. <https://www.jstor.org/stable/27116757>.
13. Zgurovs'kyj, M. Z., Bidjuk, P. I., Terent'jev, O. M., Prosjankina-Zharova, T. I. (2015). Bajjesivs'ki merezhi v systemah pidtrymky pryjnjattja rishen': navch. posib. Kyiv: Edel'vejs [in Ukrainian].
14. Trofymchuk, O., Bidjuk, P., Kozhuhivs'ka, O., Kozhuhivs'kyj, A. (2015). Jmovimisno-statystychni nevyznachenosti v systemah pidtrymky pryjnjattja rishen'. *Visnyk Nacional'nogo universytetu «L'vivs'ka politehnika»*, 826, 237–248 [in Ukrainian].
15. Dovgyj, S. O., Bidjuk, P. I., Trofymchuk, O. M. (2014). Systemy pidtrymky pryjnjattja rishen' na osnovi statystychno-jmovirnisnykh metodiv. Kyi'v: Logos [in Ukrainian].
16. Zgurovs'kyj, M. Z., Pankratova, N. D. (2007). Osnovy systemnogo analizu. K.: Vydavnycha grupa BHV [in Ukrainian].

17. Sankoff, D., Kruskal, J. (1999). Time warps, string edits, and macromolecules: The theory and practice of sequence comparison. <https://web.stanford.edu/group/cslipublications/cslipublications/site/1575862174.shtml>
18. Beyer, W.A., Stein, M.L., Smith, T.F, Ulam, S.M. (1974). A molecular-sequence metric and evolutionary trees. *Mathematical Biosciences*, 19, 9-25. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0025556474900285>
19. Wilbur, W.I., Lipman, D.I. (1983). Rapid similarity searches of nucleic acid and protein data banks. *Proceeding of the National Academy of Science of the USA*, 80, 726-730. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6572363/>
20. Schubert, S., Lee, T. (2011). Time Series Data Mining with SAS® Enterprise Miner. *Proceedings of the SAS Global Forum 2011 Conference*. SAS Institute Inc., Cary, NC. <https://support.sas.com/resources/papers/proceedings11/160-2011.pdf>
21. Leonard, M., Sloan, J., Lee, T., Elsheimer, B. (2007). An Introduction to Similarity Analysis Using SAS. *Proceedings of the SAS Global Forum 2007 Conference*. SAS Institute Inc., Cary, NC. <https://support.sas.com/rnd/app/ets/papers/similarityanalysis.pdf>

The article was received 14.02.2025 and was accepted after revision 29.04.2025

Трофимчук Олександр Миколайович

доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: Чоколівський бульвар, 13, м. Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** trofymchuk@nas.gov.ua

Коваль Роман Григорович

здобувач, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: Чоколівський бульвар 13, Київ 03186, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-3821-3378> **e-mail:** roman.koval.science@gmail.com

Зарудний Олексій Борисович

здобувач, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: Чоколівський бульвар 13, Київ 03186, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-7462-3899> **e-mail:** oleksii.zarudnyi@gmail.com

УДК 502.51:504.5

Vladyslav Vasylenko, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Viacheslav Okhariev, Candidate of Engineering Science, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

Taras Trysnyuk, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Kateryna Yushchenko, Doctor of Philosophy
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5183-816X> **e-mail:** yushchenko@gmail.com

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

DIGITALIZATION OF PERSONNEL MANAGEMENT PROCESSES FOR THE POST-WAR RECOVERY OF UKRAINE

Abstract. *The effective recovery of Ukraine must be based on harmoniously combined modern technologies, human resources and strategic planning, which will allow not only to restore the destroyed infrastructure, but also to lay the foundation for the sustainable development of the country in the future.*

The work is devoted to solving the scientific and practical problem of personnel management, which takes into account modern processes of digitalization and the capabilities of network technologies in the selection, assessment and training of personnel for the post-war reconstruction of Ukraine. The issues of developing models and tools for personnel management taking into account modern processes of digitalization and the capabilities of network technologies in the selection, assessment and training of personnel are considered. The main goal of the research is to create an automated decision support system for optimizing the processes of personnel selection and training. For this purpose, a generalization and systematization of existing models, methods and approaches in the field of personnel management was carried out, which allows forming a scientific and methodological basis for increasing the efficiency of personnel management. The proposed conceptual model ensures a high-quality level of candidate training, their adaptation and the efficiency of performing the assigned tasks. A generalized scheme for implementing a personnel selection system implemented in a web environment has been developed. In the above scheme, identification is understood as monitoring the user's compliance with the entered data and visual image.

During identification, data on user behavior (answers, previous training) that were obtained earlier are pulled up. A correspondence scheme is built that allows the system to compare information obtained earlier with information that will be obtained when using the system.

Keywords: *information technology, digitalization, conceptual model, automated system, modeling accuracy, civilian professions, personnel management, post-war recovery, communication channels.*

В.М. Василенко, В.О. Охарєв, Т.В. Триснюк, К.С. Ющенко

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

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ РОБОТИ З ПЕРСОНАЛОМ ДЛЯ ПОВОЄННОГО ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ

Анотація. У процесі відновлення України вже зараз виникають два ключові виклики. Перший – забезпечення висококваліфікованими кадрами, здатними працювати з сучасними технологіями для оперативної відбудови промисловості. Другий – перекваліфікація військових у цивільні професії з урахуванням їхнього досвіду, навичок та вмінь.

Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в управлінні персоналом, з урахуванням сучасних процесів цифровізації та можливостей мережесих технологій у відборі, оцінці та сфері навчання кадрів для повоєнного відновлення України. Основна мета дослідження – створення автоматизованої системи підтримки рішень для оптимізації процесів підбору та підготовки персоналу. Для цього проведено узагальнення та систематизацію існуючих моделей, методів і підходів у сфері кадрового менеджменту, що дозволяє сформувати науково-методичну базу для підвищення ефективності управління персоналом. Запропонована концептуальна модель забезпечує якісний рівень підготовки кандидатів, їх адаптацію та ефективність виконання поставлених завдань.

Розроблено узагальнену схему реалізації системи підбору персоналу, реалізовану у веб-середовищі. На наведеній схемі під ідентифікацією розуміється контроль відповідності користувача введеним даним та візуальному зображенню. При ідентифікації підтягуються дані щодо поведінки користувача (відповіді, попереднє проходження навчання), які були отримані раніше. Будується схема відповідності, яка дозволяє системі співставити інформацію, отриману раніше, з інформацією, яка буде отримана під час використання системи.

Ключові слова: інформаційні технології, цифровізація, концептуальна модель, автоматизована система, точність моделювання, цивільні професії, управління персоналом, повоєнне відновлення, канали зв'язку.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.136-142>

Вступ

У процесі відновлення України вже зараз виникають два ключові виклики. Перший – забезпечення висококваліфікованими кадрами, здатними працювати з сучасними технологіями для оперативної відбудови промисловості. Другий – перекваліфікація військових у цивільні професії з урахуванням їхнього досвіду, навичок та вмінь, а також відновлення професійної компетентності спеціалістів, які втратили роботу або тривалий час не мали можливості підвищити кваліфікацію через війну. Ефективна інтеграція цих навичок в економіку потребує комплексного підходу, який включає створення державних та приватних програм перепідготовки, розвиток інноваційних технологічних кластерів та співпрацю між освітніми установами, промисловістю та міжнародними партнерами.

Особливу увагу слід приділити стимулюванню підприємництва серед ветеранів та демобілізованих військових, оскільки їхній досвід управління, стратегічного планування та роботи в умовах високого стресу може бути корисним у цивільному секторі. Варто розробляти грантові програми, сприяти розвитку малих і середніх підприємств, залучати колишніх військових до реалізації інфраструктурних проєктів, де їх організаційні та технічні навички будуть затребувані.

Крім того, слід активізувати міжнародне партнерство у сфері технологічного обміну та залучення інвестицій для розвитку ключових секторів економіки – машинобудування, ІТ, енергетики, оборонно-промислового комплексу.

Отже, ефективне відновлення України має базуватися на гармонійно поєднаних сучасних технологіях, кадровому потенціалі та стратегічному плануванні, що дозволяє не лише відновити зруйновану інфраструктуру, а й закласти фундамент для сталого розвитку країни в майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розробка моделей та інструментальних засобів для автоматизованого відбору персоналу ґрунтується на широкій теоретичній базі. Дослідження таких науковців, як R. Duchessi, D. O'Keefe, V. Kolbjornsrud, M. El Khatib, O'Leary, H. McGrath, J. Ndiaye, B.M. Mohsen, O. Брінцева та А. Матвійчук, присвячені сучасним підходам, методам і моделям алгоритмізації. Серед українських науковців значний внесок у цю сферу зробив доктор технічних наук А.І. Шевченко, чії дослідження присвячені використанню елементів штучного інтелекту для управління персоналом. Загальна тенденція цифровізації України вимагає впровадження рішень, які не дозволяють підготовку деяких кадрів без відриву від робочого процесу. Це включає можливість самостійного визначення прогалин у знаннях, опанування нових навичок, а також проходження тестування. Подібні завдання вже реалізуються на глобальному рівні, зокрема компанією Google, яка ще кілька років тому запровадила систему інтерактивних курсів. Ця система забезпечує отримання цифрових сертифікатів-«плашок» (знаків відповідності) для підтвердження успішного проходження навчання, що дозволяє фахівцям сформувати власну професійну анкету та підтвердити компетенцію.

Метою цієї роботи є розробка моделей та засобів для управління персоналом, які враховують сучасні процеси цифровізації та можливості мережових технологій у відборі, оцінці та сфері навчання кадрів, інший інструмент для повторення. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити таке завдання:

- узагальнити та систематизувати існуючі моделі, методи й підходи до реалізації системи відбору персоналу, на основі чого формувати науково-методичну базу для вирішення поставлених завдань;

- розробити концептуальну модель автоматизованої системи підтримки рішень для відбору та навчання персоналу, яка забезпечує рівень підготовки кандидатів, їхню здатність до адаптації та ефективність у виконанні поставлених завдань.

Об'єктом дослідження є процес інформаційних технологій для управління персоналом, які враховують сучасні процеси цифровізації.

Виклад основного матеріалу дослідження

Під час розробки моделей та інструментальних засобів для прийняття рішень з відбору персоналу, які використовують сучасні підходи, зокрема елементи штучного інтелекту, здійснюється зовнішній вплив на об'єкт керування. У даному випадку об'єктом керування виступає саме технічний пристрій, який реалізує алгоритм чи то відбору необхідного фахівця, чи то визначення його рівня підготовки з наступним запуском задачі з навчання. Ці впливи надають поштовх системі, як позитивний, так і негативний, бо можуть мати деструктивний характер, в результаті чого алгоритми функціонування можуть почати працювати невірно.

Параметри на вході об'єкта керування завантажують його початковий стан і в процесі функціонування повинні цілеспрямовано змінюватися або залишатися сталими. Це керовані величини, що залежать від вхідних впливів. Наприклад, на вході об'єкта управління можуть бути відео, текст і дії користувача, а вхідними впливами є такі фактори, як швидкість потоку відео, параметри обміну даними в мережі та підтримка сигналу введеного тексту з клавіатури. Керуючим впливом в аналізованій системі є швидкість обміну даними в мережі. Таким чином, обмеженням для систем підбору та навчання кадрів є сукупність параметрів, що включають технічні характеристики комунікаційної техніки, сервера та мережі. Без того, значущими обмеженнями можуть бути ергономічні фактори, які сприяють швидкому спілкуванню користувача.

Виходячи із наведених вище невирішених питань, врахувати подібні керуючі впливи, обмеження та вхідні параметри можна при реалізації такої системи у веб-середовищі – на Інтернет-платформі. Одним із варіантів реалізації може виступати 3D резюме.

3D резюме є новим поняттям в процедурах підбору, сегментації та навчанні кадрів. Хоча деякі організації вже використовують цей інструмент, проте чіткого визначення 3D резюме поки не існує. Проте, виходячи з ознак тривимірного простору, як представлення деякого об'єкта в тривимірній Декартовій системі координат [1, 2] та поняття резюме, як документа про професійні досягнення особи [3], можна визначити 3D резюме як електронний документ (наприклад, HTML документ), який представляє професійні досягнення особи в трьох вимірах (інтерактивне представлення – текстові документи, співбесіда з відеозаписом та тестування в режимі онлайн).

Для взаємодії людини і машини під час проходження 3D резюме повинен бути розроблений спеціальний інтерфейс, який не лише дозволяє виконати завдання, а й стає певним завданням «нульового» рівня, яке визначає здатність людини зорієнтуватися та спланувати етапи проходження резюме.

За основу розробки такого інтерфейсу користувача можна використати WIMP (Windows, Icons, Menus, Pointing Device) як засіб взаємодії через вікна, меню та графічні елементи інтерфейсу 3D резюме. WIMP наразі є дещо застарілою технологією [4, 5], проте деякі елементи випробувані часом та надійно зарекомендували себе у процедурах навчання для зменшення когнітивного навантаження на користувача в період активного отримання знань [6-8].

При заповненні 3D резюме користувач несе деяке інтелектуальне навантаження (ІН)(R_x) при реалізації задачі R_x в системі 3D резюме:

$$IH(R_x) = \sum_{s(x)} \sum_{g(x)} m_{s(x),g(x)} r_{s(x),g(x)}, \quad (1)$$

де: $m_{s(x),g(x)}$ – кількість виконаних операцій $g(x)$, в процедурі $s(x)$ задачі R_x ;

$r_{s(x),g(x)}$ – витрати праці операцій $g(x)$ процедури $s(x)$ задачі R_x в процесі її вирішення людиною (одиниці виміру обираються при організації досліджень).

Визначити те, яким чином система, що розробляється, може знизити інтелектуальне навантаження від роботи, дозволяючи повністю зацентувати увагу на вирішенні задачі, можна через показник CAIQ, який наближує розуміння роботи системи саме до механізмів роботи ШІ [9]:

$$CAIQ = \frac{IH(R_0) - IH(R_x)}{IH(R_0)}, \quad (2)$$

де: R_0 – деяка базова реалізація або аналогічна система, з якою відбувається порівняння.

Як можна зазначити з (2), результати можуть бути наступними:

- а) $IH(R_x) = 0$, $CAIQ=1$;
- б) $IH(R_0) = IH(R_x)$, $CAIQ = 0$;
- в) $IH(R_x) > IH(R_0)$, $CAIQ < 0$.

При отриманні останнього результату слід звернути увагу, що реалізація R_x є гіршою за базову.

Враховуючи типову схему проведення пошуку у веб-середовищі, включаючи логіко-семантичний апарат цього процесу [10], а також роботи до організації інтерфейсу користувача [9, 10], можна навести узагальнену схему реалізації системи підбору персоналу, реалізовану у веб-середовищі (рис. 1).

На наведеній схемі під ідентифікацією розуміється контроль відповідності користувача введеним даним та візуальному зображенню. При ідентифікації підтягуються дані щодо поведінки користувача (відповіді, попереднє проходження навчання), які були отримані раніше. Будується схема відповідності, яка дозволяє системі зіставити інформацію, отриману раніше, з інформацією, яка буде отримана під час використання системи.

Ідентифікація може проходити як із використанням підказки, так і без неї. У першому випадку відповідь користувач має можливість вибрати із запропонованого списку або ввести його самостійно. У другому варіанті відповідність відповіді перевіряється шляхом порівняння з еталонним словом або характерними комбінаціями символів.

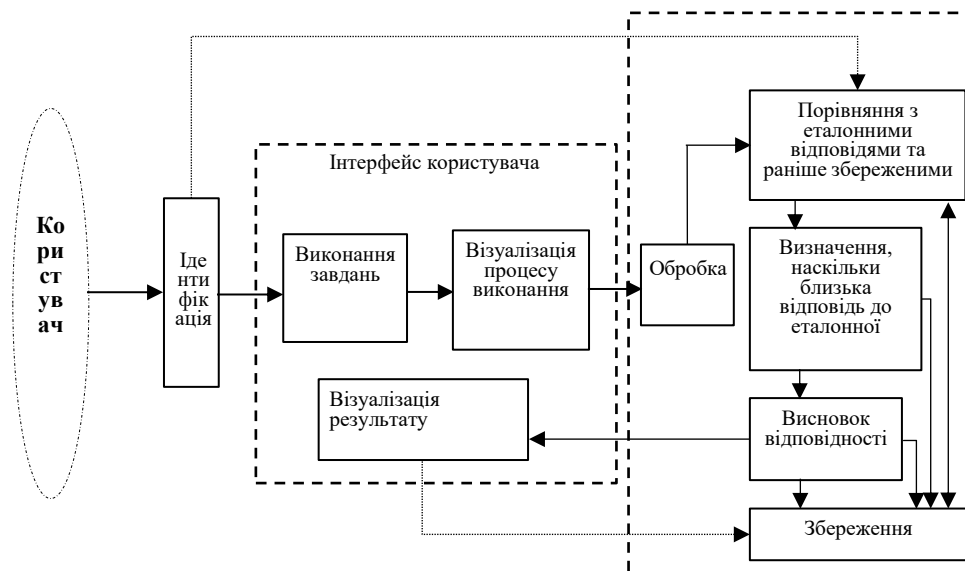


Рис. 1. Узагальнена схема реалізації системи підбору персоналу, реалізована у веб-середовищі

Якщо введене слово має відповідний еталонний аналог, процес візуальної ідентифікації за цим критерієм визначається завершеним. В іншому випадку відповідь не зараховується, що може призвести до невдалого проходження тестування, або користувачеві пропонують нове завдання для оцінки.

Висновки

Узагальнюючи викладене, варто зазначити, що створюючи систему підбору, сегментації та навчання кадрів з використанням елементів штучного інтелекту, мета вже закладена у самій суті – за допомогою інформаційної технології знайти людину, що відповідає встановленим правилам зі спрощенням, яке стосується вибору підмножини інформації, що характеризує певну спеціальність та вимоги до спеціаліста на означену посаду. Залишається окреслити множину фактів, правила відбору на основі правил комбінаторики та реалізувати відповідний інтерфейс для втілення механізму вводу інформації, який дозволить отримати необхідну інформацію, до якої і будуть застосовані обрані правила для перевірки відповідності всіх фактів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Luthans, F. & Doh Jonathan, P. (2017). International Management, Culture, Strategy and Behavior (10th ed.). Mc Graw Hill. ISBN: 1259705072.
2. Brannan, David A.; Esplen, Matthew F.; & Gray, Jeremy J. (1998). Geometry. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0-521-59787-0.
3. Klepko, V.Yu., & Golets, V.L. (2009). Rectangular coordinates in space. Higher mathematics in examples and problems (2nd edition). Kyiv: Center for Educational Literature (in Ukrainian). [Клепко, В.Ю., Голець, В.Л. (2009). Прямокутні координати в просторі. Вища математика в прикладах і задачах. 2-ге видання. К. : Центр учбової літератури].

4. Shevchuk, S. (2007). Ukrainian business speech: textbook. Kyiv: Ariy (in Ukrainian). [Шевчук, С. (2007). Українське ділове мовлення : підручник. К.: Арії].
5. Drucker, J. (2013). Reading Interface. *PMLA*, 128(1), 213-220. doi:10.1632/pmla.2013.128.1.213
6. Andries van Dam. (1997). Post-WIMP User Interfaces. *Communications of the ACM*, 40(2), 63-67. doi:10.1145/253671.253708
7. Green, Mark; Jacob, Robert (July 1991). "SIGGRAPH '90 Workshop Report: Software Architectures and Metaphors for Non-WIMP User Interfaces". SIGGRAPH '90. SIGGRAPH. Dallas: ACM SIGGRAPH. CiteSeerX 10.1.1.121.7982
8. Trofymchuk, O.M., Bidyuk, P.I. (2019). Decision support systems, modeling, forecasting, risk estimation. LAP LAMBERT Academic Publishing.
9. Zaitsev, S., Vasylenko, V., Trysnyuk, V., & Trysnyuk, T. (2023). Adaptive method for assessing information reliability under uncertainty for 5G and IoT systems. 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, November 22–24, 2023. Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. Retrieved from <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper2.pdf>
10. Trysnyuk, V., Ehorov, V., Trysnyuk, T., Prystupa, V., Nahornyj, Ye., & Marushchak, V. (2022). Improvement of The System of Automated Pointing of the Antenna to the Satellite. In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, 15–18 November 2022, Kyiv, (pp. 1–5). DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580098>

Стаття надійшла до редакції 25.11.2024 і прийнята до друку після рецензування 24.02.2025

The article was received 25.11.2024 and was accepted after revision 24.02.2025

Василенко Владислав Михайлович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу інформаційних та комунікаційних технологій Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** vladvasilenko9@gmail.com

Охарєв Вячеслав Олександрович

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

Триснюк Тарас Васильович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу прикладної інформатики Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

Ющенко Катерина Сергіївна

доктор філософії, молодший науковий співробітник відділу інформаційних та комунікаційних технологій Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5183-816X> **e-mail:** k.yuschenko@gmail.com

УДК 004.7

Mykola Khudyntsev, Candidate of Physical and Mathematic Science, Associated Professor, The Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-6901> **e-mail:** nh@te.net.ua

Oleksii Khomenko, postgraduate, The Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4866-8244>

e-mail: oleksii.khomenko.sci@gmail.com

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

AUTOMATION OF STANDARDIZED CYBER INSURANCE PROCESSES

Abstract. *The study aims to develop a cyber insurance model that includes the main requirements of international regulatory documents and provides for the automation of individual processes of cyber insurance.*

The objectives of the study are to analyze existing standards, business processes of insurance of operational risks in cyberspace, means of automating insurance processes, forming a profile of cyber risks in the national cybersecurity system, critical information infrastructure, studying cyber insurance algorithms for their further automation, and substantiating the use of individual automation tools in practical activities.

The work contains a review of existing standards and processes of insurance of operational risks in cyberspace (cyber insurance) and an analysis of cyber insurance processes using information technologies. The state of the regulatory framework of cyber insurance in Ukraine is briefly analyzed. The cyber insurance processes provided for by the International Standard ISO / IEC 27102 Information Security Management – Guidelines for Cyber Insurance are studied in detail. Separate means of automating cyber insurance processes are also considered, and approaches to optimizing their use within the framework of a risk-based approach to the profile of risks in cyberspace (cyber risks) are proposed.

Analysis of cyber insurance and other preventive methods of reducing risks and the negative impact of threats in cyberspace indicates an unsatisfactory state of using such instruments in critical information infrastructure.

The work substantiates and proposes a systemized set of cyber insurance processes for effective automation of these processes and further practical application in the design tasks of relevant automated (information and communication) systems.

The results obtained can be used in cyber insurance scenarios and algorithms.

Keywords: *cyber insurance; information security; automation; cyber risks.*

М.М. Худинцев, О.А. Хоменко

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

АВТОМАТИЗАЦІЯ СТАНДАРТИЗОВАНИХ ПРОЦЕСІВ КІБЕРСТРАХУВАННЯ

Анотація. Основною метою дослідження є розробка моделі кіберстрахування, яка враховує основні вимоги міжнародних нормативних документів та передбачає автоматизацію окремих процесів кіберстрахування.

Завдання дослідження полягають в аналізі існуючих стандартів, процесів страхування операційних ризиків у кіберпросторі, засобів автоматизації процесів страхування, формуванні профілю кіберризиків у національній системі кібербезпеки, критичній інформаційній інфраструктурі, дослідженні алгоритмів кіберстрахування з метою їх подальшої автоматизації, обґрунтуванні застосування окремих засобів автоматизації в практичній діяльності.

Робота містить огляд існуючих стандартів та процесів страхування операційних ризиків у кіберпросторі (кіберстрахування), а також аналіз процесів кіберстрахування із застосуванням інформаційних технологій. Стисло проаналізовано стан нормативно-правової бази кіберстрахування в Україні. Детально досліджені процеси кіберстрахування, передбачені Міжнародним стандартом ISO / IEC 27102 Управління інформаційною безпекою – Вказівки щодо кіберстрахування. Також досліджені окремі засоби автоматизації процесів кіберстрахування, запропоновані підходи до оптимізації їх використання в рамках ризик-орієнтованого підходу для профілю ризиків у кіберпросторі (кіберризиків).

Аналіз застосування кіберстрахування, а також інших превентивних методів зменшення ризиків та негативного впливу загроз у кіберпросторі свідчить про незадовільний стан використання таких методів у критичній інформаційній інфраструктурі.

У роботі обґрунтовано та запропоновано систематизацію процесів кіберстрахування для ефективної автоматизації цих процесів та подальшого практичного застосування в задачах проєктування відповідних автоматизованих (інформаційно-комунікаційних) систем.

Отримані результати можна використовувати в алгоритмах кіберстрахування.

Ключові слова: кіберстрахування; інформаційна безпека; автоматизація; кіберризик.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.143-153>

Вступ

Питання страхування операційних ризиків у кіберпросторі (кіберстрахування) активно обговорюються у науковій спільноті (див., наприклад, [1-5]). Але на відміну від нормативних, термінологічних та фінансово-економічних аспектів, проблема автоматизації процесів кіберстрахування (як і страхування) тільки починає вирішуватися. Питання управління страховими ризиками досліджувалося К. Вільямсом, С. Волосовичем, Х. Грюндингом, Л. Клапківом та ін., кіберризиками у страхуванні – такими дослідниками: О. Гудзь, Н. Нагайчук, Л. Селіверстова, А. Marotta, R. Böhme, A.G. Schwartz, S. Romanovsky, R.R. Wagner, Р. Пікус, М. Дубина та ін., але, як правило, лише з економічної точки зору.

Гостра потреба у створенні нормативного підґрунтя для страхування кіберризиків призвела до появи низки спеціалізованих стандартів у галузі страхування та інформаційної безпеки [8-17], основним серед яких є International Standard ISO/IEC 27102:2019(E) [8]. Основну увагу ці документи приділяють визначенню, пріоритезації та калькуляції кіберризиків та підвищенню ефективності страхування.

До основних нормативних документів, які діють у сфері страхування та кіберстрахування в Україні, належать Цивільний кодекс України (зі змінами), закони України «Про страхування» (2021), «Про фінансові послуги та фінансові компанії» (2021), Постанови Національного банку України «Про затвердження Положення про встановлення критеріїв, за якими визначається профіль ризику надавачів фінансових послуг, їх суспільна важливість, на підставі яких визначаються наглядові дії Національного банку України» (2023), «Про затвердження Положення про порядок обліку страховиком договорів, пов'язаних зі здійсненням діяльності із страхування, та вимоги до захисту інформації страховика» (2023), «Про затвердження Положення про характеристики та класифікаційні ознаки класів страхування, особливості здійснення діяльності зі страхування та укладання договорів за класами страхування» (2023). Аналіз ринку страхових послуг в Україні, страхових ризиків, інформаційних потоків, бізнес процесів страхування та кіберстрахування наведено в [18-21].

Актуальні питання моніторингу та управління кіберризиками, страхування та кіберстрахування активно обговорюються у світовій науковій та бізнес спільноті, кількість відповідних публікацій зростає надзвичайно високими темпами (див. огляди [22-24]).

Водночас систематизація, алгоритмізація та автоматизація процесів страхування та кіберстрахування внаслідок їх складності та багатофакторності, що підтверджується численними аналітичними звітами у сфері страхування, залишається складною і одночасно затребуваною науково-практичною задачею, яка потребує розв'язання.

Автоматизація окремих сервісів страхування та кіберстрахування реалізована у інформаційних системах (платформах) управління ризиками, страховими подіями та документами, маркетинговими та статистичними даними великої кількості страхових компаній (що буде проаналізовано нижче).

Стандарти в сфері кіберстрахування

Найпоширеніші визначення або трактування кіберстрахування:

- Кіберстрахування – це механізм захисту бізнесу від фінансових втрат, пов'язаних з кібератаками та витоком даних (Федеральна торгова комісія США / FTC) [25]. Поліси можуть покривати витрати на юридичний захист, відновлення даних, компенсацію збитків клієнтам та штрафи від регуляторів.
- Кіберстрахування – це фінансовий інструмент для зменшення ризиків, пов'язаних з порушеннями безпеки даних та кібератаками, який сприяє підвищенню обізнаності компаній про ризики та їх мінімізацію (Європейське агентство з кібербезпеки / ENISA) [26].
- Кіберстрахування є ключовим елементом стратегії кібербезпеки, який допомагає компенсувати збитки від атак та покращити загальний рівень стійкості компанії (Національний інститут стандартів і технологій США / NIST) [27].

До стандартів (у т.ч. фреймворків) в сфері кіберстрахування, зокрема, належать:

- ISO/IEC 27102:2019 – Information Security, Cybersecurity, and Privacy Protection – Guidelines for Cyber Insurance – стандарт ISO, який пропонує вказівки щодо структурування полісів кіберстрахування, включаючи оцінку ризиків і міркування щодо покриття полісів;
- EU Cybersecurity Certification Framework (Regulation (EU) 2019/881) – встановлює механізми сертифікації кібербезпеки для продуктів, послуг і процесів ІКТ, спрямованих на забезпечення стандартизованих рівнів забезпечення кібербезпеки в ЄС, який має вирішальне значення для оцінки кіберризиків та ризиків кіберстрахування;
- ENISA Cyber Insurance: Recent Advances, Good Practices, and Challenges (November 2016) – описані ключові аспекти кіберстрахування, у т.ч. обізнаність про кіберризик, регуляторний вплив (GDPR, Директива NIS, з подальшою імплементацією до NIS2), найкращі практики;
- NIST Cybersecurity Framework (CSF2) – рекомендації з керування ризиками кібербезпеки та їх зменшення для використання в полісах (договорах) кіберстрахування для оцінки стану безпеки організації;
- Issues Paper on Insurance Sector Operational Resilience (May 2023) – документ Цільової групи IAIS з операційної стійкості (ORTF) містить наглядні практики щодо кібервідмовостійкості (кіберрезильєнтності), аутсорсингу процесів ІТ та кібербезпеки, управління безперервністю бізнесу (безпосередньо не стосується кіберстрахування, але фактично описує ключові елементи андеррайтингу);
- Cyber Essentials Certification та Cyber Liability Insurance [28] – система сертифікації основ кібербезпеки та кіберстрахування від Національного центру кібербезпеки Великої Британії NCSC та його офіційного партнера Міжнародної асоціації безпечного управління підприємствами IASME.

Аналіз стандартів та фреймворків кіберстрахування свідчить про:

- Використання підходів та моделей оцінки ризиків та управління такими ризиками;
- Застосування кіберризиків, операційних ризиків у кіберпросторі, фінансових ризиків, пов'язаних з ймовірністю втрати грошових коштів, неотриманням (недоотриманням) доходів (прибутку), іншими збитками та/або витратами, включаючи можливі збитки (витрати);
- Застосування опису та існуючих класифікацій кіберризиків та кіберінцидентів;
- Важливість кількісної оцінки безпеки та стійкості ланцюгів постачання, залучення постачальників до реагування на надзвичайні події (у т.ч. у кіберпросторі);
- Застосування прийнятих підходів та моделей до формулювань виключень з полісів кіберстрахування, обмеження сум покриття, оцінки ризиків андеррайтингу;
- Необхідність стандартизації процесів збору інформації, оцінка кіберризиків страхувальника, підтримки кіберстрахування за допомогою систем управління інформаційною безпекою, обміну інформацією про ризики та засоби контролю в екосистемі кіберстрахування.

Інформаційно-комунікаційні засоби кіберстрахування

Провідні страхові компанії активно використовують сучасні інформаційно-комунікаційні технології та інструменти для автоматизації процесів страхування та кіберстрахування. Опис окремих рішень наведено у *Таблиці 1*.

Таблиця 1. Інформаційно-комунікаційні засоби страхування та кіберстрахування

<i>Company (resource) title</i>	<i>Link</i>	<i>IC instruments</i>	<i>CIM*</i>
Coalition	https://www.coalitioninc.com/	Active Insurance: - Cyber Insurance - Tech Errors & Omissions (EO) - Executive Risks - Miscellaneous Professional Liability Coalition Security: - Coalition Control - Managed Detection & Response (MDR) - Coalition Incident Response (CIR) - Coalition Security Awareness Training	+++
At-Bay	https://www.at-bay.com/	- Cyber risk calculator - Primary & Excess Appetite eForm Guide - Miscellaneous Professional Liability (MPL) Coverage Highlights eForm Guide - Managed Detection and Response (MDR) Service Desk - Broker Platform	+
Cowbell Cyber	https://cowbell.insure/	Adaptive Cyber Insurance (Cowbell Prime 100, 100 PRO, 250, PLUS, ONE) Adaptive Technology Errors & Omissions (Cowbell Prime Tech) Incident Response Plan (IPR) Template	+
Corvus Insurance	https://www.corvusinsurance.com/	Smart Cyber Insurance, Smart Tech EO (Appetite Guide, Application, Request Coverage Form) Expert incident response and claims management (eForm)	++
Beazley	https://www.beazley.com/	Cyber Customer Centre - Risk Management Webinars - Incident Preparation Room - Port scanning and monitoring - Free Phishing Test - IRP Review Broker Centre - API Trading - Cyber Risk Management Tools - Cyber Defences with Managed eXtended Detection and Response (MXDR)	+++

Chubb	https://www.chubb.com/	Individuals & Families Portal Businesses Portal Agents & Brokers Portal Payment Center Chubb Mobile App Chubb Cyber Incident Response Team Report a Claim eForm	++
AIG	https://www.aig.com/	- Cyber Highlight Sheet - AIG's Cyber Coverages - AIG's Cyber Underwriting Application - Sample Client Cyber Maturity Report	+
AXA XL	https://axaxl.com/	- XL GlobalClaim Customer Portal - Design Professional login portal Learning Management System (XLDP LMS)	+
CFC Underwriting	https://www.cfcunderwriting.com/	- Cyber insurance private enterprise application form - Ransomware calculator - CFC mobile app for cyber	++
Liberty Mutual Insurance	https://www.libertymutual.com/	Liberty Mutual app	–
Berkshire Hathaway Specialty Insurance	https://bhspecialty.com/	eAppicationForms	–
Hiscox	https://www.hiscox.com/	- Hiscox General Liability - Hiscox Professional Liability - Hiscox Cyber Security - Hiscox Business Owner's Policies	+
Lloyd's of London	https://www.lloyds.com/	Member Modeller Software Lloyd's Investment Platform London Market Introductory Test (LLMIT) Delegated Authority services (DAS) - Delegated Contract and Oversight Manager (DCOM) - Delegated Audit Manager (AiMS) - Coverholder Applications (Atlas) - Lineage Regulatory reporting - Market data collections - Core Market Returns (CMR) - Lloyd's Direct Reporting (LDR) - SecureShare - Overseas Reporting Service (ORS) - Assisting issuance/print insurance documentation MOCHA/DOPRINT Placing business - Online business insurance Tool (Crystal) - Delegated Data Manager (DA SATS) - Quality Assurance Tool (QA Tool) - Risk Locator Tool (RL Tool) - Italian Web Tender Service - Faster Claims Payment	++++

Munich Re	https://www.munichre.com/	eAppictionForms	–
Swiss Re	https://www.swissre.com/	Swiss Re Surety Client Portal Property Exposure Management Sustainability Compass Supply Chain Resilience	+
Zurich	https://www.zurich.com/	Cyber Resilience and Insurance Services - Cyber and Data Protection Training - Audit and Compliance - Penetration Testing (Ethical Hacking) - Cyber Toolbox - Crisis and Incident Management - Cyber Quantification My Zurich - Insurance Management Tools - Program Status Tracker - Program Structure Matrix - Policy & Claims - Certificates - Zurich Global Program Support (GPS) Tool - Risk Management Tools - Risk Engineering - Zurich Risk Advisor - Risk Insights - Zurich Risk Room - Zurich Connector API Solution	++++
The Hartford	https://www.thehartford.com/	Hartford Platform for Producers, Brokers, Partners & Providers Hartford Electronic Business Center (EBC) - EBC Agent Portal - Commercial Lines Customer Portal (CLCP)	++
NAS Insurance	https://www.nasinsurance.com/	N/D	N/D
Safe	https://safe.security/	SAFE One Platform - AI - Driven UX - SAFE X - SAFE Mobile App - SAFE Dashboard) - Cyber Singularity Platform - Cyber Risk Quantification - Control Prioritization & Rol - Cyber Insurance Planning - Materiality Risk Reporting - Emerging Risks - Third Party Cyber Risk Management - Open Analytics Engine - MITRE ATT&CS - FAIR - FAIR CAM - FAIR MAM - FAIR TAM	++++

		- Cyber Risk Cloud - First-Party Business Context - Third-Party Business Context - Threat Intel - Enterprise Security Data - Compliance and Questionnaire Data	
International Cybersecurity University	https://icu-ng.org	Cyber Statistic Indicators - Suspicious Cyber Event Indicators - Network Cybersecurity Indices - Cybersecurity Indicators - Key Cyber Risk and Performance Indicators - ETSI Information Security Indicators - ISO27 Information Security Indicators - NIST Cybersecurity Indicators - Cybersecurity Integration Maturity Model Indicators - Public Cyber Statistics Indicators	

* Cyber Insurance Maturity

Автоматизація процесів кіберстрахування

Аналіз впроваджених у світовій практиці інформаційно-комунікаційних засобів страхування та кіберстрахування та нормативних підстав кіберстрахування дозволяє визначити основні специфічні процеси кіберстрахування (додатково до процесів страхування):

- оцінка кіберризиків (оцінка внутрішнього кіберризиків, оцінка засобів контролю інформаційної безпеки, оцінка попередніх та поточних кіберзбитків);
- управління кіберризиками;
- типізація (категоризація) кіберінцидентів;
- управління наслідками кіберінцидентів (мінімізація шкідливого впливу, забезпечення механізмів фінансування для відновлення збитків, сприяння поверненню до нормального функціонування, підвищення стійкості страховика);
- управління інформаційною безпекою під час обміну даними з страховиком;
- управління полісом кіберстрахування, підтвердженнями, витратами на реагування на кіберінциденти та кіберстраховим покриттям;
- андеррайтинг кіберстрахування;
- збір інформації з інформаційних активів (ресурсів, баз даних, систем, систем управління інформаційною безпекою);
- виконання зобов'язань, пов'язаних з інформаційною безпекою (область застосування з СУІБ, політики інформаційної безпеки, оцінка ризиків інформаційної безпеки, декларація про застосування та оцінка ефективності КСЗІ або СУІБ, обробка ризиків інформаційної безпеки, цілі інформаційної безпеки, докази компетентності персоналу, результати оцінки та обробки ризиків інформаційної безпеки, підтвердження результатів моніторингу та вимірювань, докази програм аудиторських перевірок, їх результатів, результатів управлінського аналізу, невідповідностей, подальших вжитих дій, результатів коригувальних дій).

Для оцінки рівня автоматизації зазначених процесів пропонується використовувати показники зрілості кібербезпеки (домен кіберстрахування) та ввести у розгляд індикатор автоматизації процесів кіберстрахування. Цей індикатор залишається на початковому рівні навіть для провідних страхових компаній (див. *Таблицю 1*), в Україні кіберстрахування практичне відсутнє і показники кіберстрахування не враховуються у формуванні профілів кіберризиків.

Висновки

Проаналізовано існуючі стандарти кіберстрахування, характерні бізнес-процеси кіберстрахування, засоби автоматизації процесів страхування, формування профілів кіберризиків для кіберстрахування у критичній інформаційній інфраструктурі.

Детально досліджені процеси кіберстрахування, передбачені Міжнародним стандартом ISO / IEC 27102 Управління інформаційною безпекою – Вказівки щодо кіберстрахування. Також досліджені окремі інформаційно-комунікаційні засоби страхування та кіберстрахування, запропоновані підходи до оптимізації їх використання в рамках ризик-орієнтованого підходу для профілю ризиків у кіберпросторі (кіберризиків).

Запропонована модель кіберстрахування, яка враховує основні вимоги міжнародних нормативних документів та передбачає автоматизацію окремих процесів кіберстрахування.

Аналіз застосування превентивних методів зменшення кіберризиків у критичній інформаційній інфраструктурі свідчить про незадовільний стан використання таких методів.

Запропоновано систематизацію процесів кіберстрахування у відповідності до міжнародних галузевих стандартів з можливістю практичного застосування в задачах проєктування відповідних автоматизованих (інформаційно-комунікаційних) систем.

Отримані результати можна використовувати в алгоритмах страхування та кіберстрахування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Marotta, A., Martinelli, F., Nanni, S., Orlando, A., & Yautsiukhin, A. (2017). Cyber-insurance survey. *Comput. Sci. Rev.*, 24, 35-61. <https://www.semanticscholar.org/paper/Cyber-insurance-survey-Marotta-Martinelli/ad6b9bb3ff08415901a0915ba4f1e5881fa3857e>
2. Nebolsina, E. V. (2024). Prospects for the US Cyber Insurance Market in Response to New Challenges. *Society: Politics, Economics, Law* (in Ukrainian). [Небольсіна, Є. В. (2024). Перспективи ринку кіберстрахування США у відповідь на нові виклики. *Общество: политика, экономика, право*]. <https://www.semanticscholar.org/paper/U.S.-Cyber-Insurance-Market-Outlook-in-Response-to-Nebolsina/3a52eb16d16b93874d80d7617f79c98c65336564>
3. Rangu, C.M., Badea, L., Scheau, M.C., Găbudeanu, L., Panait, I., & Radu, V. (2024). Cyber insurance risk analysis framework considerations. *The Journal of Risk Finance*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Cyber-insurance-risk-analysis-framework-Rangu-Badea/3128ad0b22be3684cb5a3aff7da34120475e67df>
4. Adriko, R., & Nurse, J.R. (2024). Cybersecurity, cyber insurance and small-to-medium-sized enterprises: a systematic Review. *Inf. Comput. Secur.*, 32, 691-710. <https://www.semanticscholar.org/paper/Cybersecurity%2C-cyber-insurance-and-enterprises%3A-a-Adriko-Nurse/b0dff05f5f8746d38ade3fe07ca227545e8fce0# citing-papers>

5. Bace, B., Dubois, E., & Tatar, U. (2024). Resilience against Catastrophic Cyber Incidents: A Multistakeholder Analysis of Cyber Insurance. *Electronics*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Resilience-against-Catastrophic-Cyber-Incidents%3A-A-Bace-Dubois/9541205d5c607870f89eefd1e42181e6b44bc453>
6. Nobanee, H., Alodat, A.Y., Dilshad, M.N., El Sayah, A., Alas'ad, S.N., Al Shalabi, B.O., Alsadi, S.F., Al Marri, N.M., & Fiza, F.K. (2023). Mapping cyber insurance: a taxonomical study using bibliometric visualization and systematic analysis. *Global Knowledge, Memory and Communication*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Mapping-cyber-insurance%3A-a-taxonomical-study-using-Nobanee-Alodat/43250d49df871cfd871cfdbf7024c2a03b2c1007c55ec9>
7. Koshkin, D. (2023). Cyber risks: Prospective Control Instruments (using the example of Cyber Insurance). *Artificial societies*. [https://www.semanticscholar.org/paper/Cyber-risks%3A-Prospective-Control-Instruments-\(using-Koshkin/58bce94470d7ada09338f49f1a154a66d91edfc3](https://www.semanticscholar.org/paper/Cyber-risks%3A-Prospective-Control-Instruments-(using-Koshkin/58bce94470d7ada09338f49f1a154a66d91edfc3)
8. International Standard ISO/IEC 27102:2019(E) Information security management – Guidelines for cyber-insurance. First edition 2019-08.
9. European Union Agency for Network and Information Security (ENISA) (2016). *Cyber Insurance: Recent Advances, Good Practices and Challenges*, November 2016. <https://www.enisa.europa.eu/publications/cyber-insurance-recent-advances-good-practices-and-challenges>
10. European Insurance and Occupational Pensions Authority (EIOPA) (2019). *Cyber Risk for Insurers–Challenges and Opportunities*. https://www.eiopa.europa.eu/document/download/61701869-eab9-49c7-a9ec-14d0b810f755_en?filename=Cyber%20Risk%20for%20Insurers%20-%20Challenges%20and%20Opportunities.pdf
11. International Association of Insurance Supervisors (IAIS) (2020). *Cyber Risk Underwriting Identified Challenges and Supervisory Considerations for Sustainable Market Development*, December 2020. https://www.iais.org/uploads/2022/01/201229-Cyber-Risk-Underwriting_-Identified-Challenges-and-Supervisory-Considerations-for-Sustainable-Market-Development.pdf
12. Privacy + Security Academy. (2021). *Cyber liability insurance buying guide 2021*. Privacy + Security Academy. <https://www.privacysecurityacademy.com/wp-content/uploads/2024/05/Cyber-Liability-Insurance-Buying-Guide-2021.pdf>
13. Prudential Regulation Authority (2016). *Cyber insurance underwriting risk: Consultation Paper CP39/16* (November), Bank of England, London. <https://www.bankofengland.co.uk/prd/Documents/publications/cp/2016/cp3916.pdf>
14. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2017). *Enhancing the role of insurance in cyber risk management*. OECD Publishing. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/12/enhancing-the-role-of-insurance-in-cyber-risk-management_g1g82a47/9789264282148-en.pdf
15. Professional Risk Underwriting Pty Ltd (2021). *ProRisk Cyber & Privacy Liability Insurance Policy v04.21*. <https://www.prorisk.com.au/siteassets/documents/policy-wordings/prorisk-cyber-privacy-liability-insurance-policy-v04.21.pdf>
16. Philadelphia Insurance Companies (2021). *Cyber security liability policy form (Form 36-8835)*. <https://www.phly.com/files/Cyber%20Security%20Liability%20Policy%20Form36-8835.pdf>
17. Royal & Sun Alliance Insurance plc (2018). *Cyber Risk Insurance Policy*. <https://static.rsagroup.com/ras/commercial-insurance-products/cyber/cyber-risk-insurance-policy-wording.pdf>
18. Klapkiv, Yu.M. (2020). *Insurance Services Market: Conceptual Principles, Technical Innovations and Development Prospects: Monograph*. Ternopil: TNEU (in Ukrainian). [Клапків Ю.М. Ринок страхових послуг: концептуальні засади, технічні інновації та перспективи розвитку: монографія. Тернопіль: ТНЕУ].
19. Lashchuk, I., Kondrat, I., Viblyy, P., & Bilets, V. (2020). Insurance market of Ukraine: current state and development prospects. *Galician Economic Bulletin*, 5 (66), 105–112 (in Ukrainian). [Лашчик, І., Кондрат, І., Віблій, П., Білець, В. (2020). Страховий ринок України: сучасний стан та перспективи розвитку. *Галицький економічний вісник*, 5 (66), 105–112].

20. Marina, A.S., Petsenko, M.V. (2023). Insurance market of Ukraine in wartime. *Digital economy and economic security*, 5 (05), 44–51 (in Ukrainian). [Марина, А.С., Пеценко, М.В. (2023). Страховий ринок України в умовах війни. *Цифрова економіка та економічна безпека*, № 5 (05), 44–51]. <https://doi.org/10.32782/dees.5-7>
21. Korman, I., Semenda, O., & Makushok, O. (2024). Marketing research of the Ukrainian insurance market. *Kyiv Economic Scientific Journal*, (4), 119–126 (in Ukrainian). [Корман, І., Семенда, О., & Макушок, О. (2024). Маркетингове дослідження українського ринку страхових послуг. *Київський економічний науковий журнал*, (4), 119–126]. <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2024-4-17>
22. Adriko, R., & Nurse, J.R. (2024). Cybersecurity, cyber insurance and small-to-medium-sized enterprises: a systematic Review. *Inf. Comput. Secur.*, 32, 691–710. <https://kar.kent.ac.uk/105932/1/ICS-2024-CyberInsurance-Security-AN.pdf>
23. McGregor, R., Reaiche, C., Boyle, S., & Zubielqui, G.C. (2023). Cyberspace and Personal Cyber Insurance: A Systematic Review. *Journal of Computer Information Systems*, 64, 157–171. <https://www.semanticscholar.org/paper/Cyberspace-and-Personal-Cyber-Insurance%3A-A-Review-Mcgregor-Reaiche/adec9dbb542cec686ca77c49094355f215755b54>
24. Khudintsev, M.M., Zhilin, A.V., Davydyuk, A.V. (2021). World Cybersecurity Indices: Overview and Methods of Formation (Global Report / Catalog). Kyiv: International University of Cybersecurity, Institute of Modeling Problems in Energy named after G.E. Pukhov NAS of Ukraine (in Ukrainian). [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.
25. Federal Trade Commission (FTC) (2024). Cyber insurance. <https://www.ftc.gov/business-guidance/small-businesses/cybersecurity/cyber-insurance>
26. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA) (2024). Cyber Insurance – Models and methods and the use of AI. <https://www.enisa.europa.eu/publications/cyber-insurance-models-and-methods-and-the-use-of-ai>
27. National Institute of Standards and Technology. (2022). *Framework for Cybersecurity Risk Management* (NIST CSWP 29). U.S. Department of Commerce. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.29.pdf>
28. National Cyber Security Centre (2025). *Cyber essentials resources*. https://www.ncsc.gov.uk/cyberessentials/resources#section_3

Стаття надійшла до редакції 12.02.2025 і прийнята до друку після рецензування 02.05.2025

The article was received 12.02.2025 and was accepted after revision 02.05.2025

Худинцев Микола Миколайович

кандидат фізико-математичних наук, доцент, академік Академії зв'язку України, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-6901> **e-mail:** nh@te.net.ua

Хоменко Олексій Антонович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-4866-8244> **e-mail:** oleksii.khomenko.sci@gmail.com

УДК 004.9+004.8]:[504.61:355.01

Vasyl Marushchak, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-9949> **e-mail:** stydjaga.fo.ru@gmail.com

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

MATHEMATICAL MODEL FOR AERIAL IMAGE DECODING AND AUTOMATED ANALYSIS OF URBAN INFRASTRUCTURE

Abstract. *This study addresses a scientific and practical challenge focused on improving the monitoring of urbanized areas by utilizing remotely piloted aerial systems (RPAS) to enhance the efficiency of detecting urban infrastructure objects (UIOs). The key factors influencing the accuracy and timeliness of UIO identification based on aerial imagery have been analyzed. The study formulates the main requirements for the image interpretation process, emphasizing the need to ensure high levels of detection speed and reliability.*

Particular attention is paid to the prospects of automating the recognition of UIOs using computer vision technologies and deep learning methods based on artificial neural networks. Within the framework of the research, a conceptual mathematical model for automated image interpretation is proposed, which provides for the detection of urban infrastructure objects through computer vision algorithms implemented via artificial intelligence technologies.

Integration of the developed model into the image processing system makes it possible to significantly improve the operational efficiency of UIO recognition while maintaining an acceptable level of interpretation accuracy. The application of such solutions is particularly relevant for real-time monitoring of changes in urban development, the condition of transportation infrastructure, engineering networks, and technogenic facilities. The use of machine learning algorithms not only facilitates object detection but also enables their functional classification with a high degree of accuracy.

Implementation of the proposed approach creates prerequisites for the automated processing of large volumes of visual data, ensuring timely responses to changes in the urban environment.

Prospects for further work include: accumulation and structuring of a specialized database of aerial photographs with marked objects of urban infrastructure, creation of a comprehensive method for automating the decoding of aerial photographs with its subsequent software implementation, implementation of comprehensive experimental studies aimed at verifying the effectiveness of the proposed mathematical model according to the criteria of efficiency and reliability.

Keywords: *information technologies, image interpretation, aerial photography, geographic information systems, object recognition, aerial data processing, machine learning.*

В.М. Марущак

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

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЕШИФРУВАННЯ АЕРОФОТОЗНІМКІВ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ АНАЛІЗУ МІСЬКОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

***Анотація.** У роботі розглянуто науково-прикладне завдання, що полягає у вдосконаленні процесу моніторингу урбанізованих територій шляхом використання дистанційно керованих літальних апаратів (БПЛА) з метою підвищення ефективності виявлення об'єктів міської інфраструктури (ОМІ). Проаналізовано основні фактори, які впливають на якість і своєчасність ідентифікації ОМІ за даними аерофотозйомки. Сформульовано вимоги до процесу дешифрування аерофотознімків з урахуванням необхідності забезпечення високої оперативності та достовірності результатів ідентифікації.*

Особливу увагу приділено перспективам автоматизації розпізнавання ОМІ з використанням технологій комп'ютерного зору та глибокого навчання на основі штучних нейронних мереж. У межах дослідження запропоновано концептуальну математичну модель автоматизованого дешифрування, яка передбачає виявлення об'єктів міської інфраструктури на основі алгоритмів комп'ютерного зору, що реалізуються засобами штучного інтелекту.

Інтеграція розробленої моделі в систему обробки зображень дає змогу підвищити рівень оперативності розпізнавання об'єктів міської інфраструктури, одночасно зберігаючи допустимий рівень достовірності дешифрування.

Застосування таких рішень особливо актуальне для оперативного моніторингу змін забудови, стану транспортної інфраструктури, інженерних комунікацій та техногенних об'єктів. Використання алгоритмів машинного навчання дає змогу не лише виявляти об'єкти, а й класифікувати їх за функціональним призначенням із високим рівнем точності. Завдяки впровадженню запропонованого підходу створюються передумови для автоматизованої обробки великих обсягів візуальної інформації, що забезпечує оперативне реагування на зміни в міському середовищі.

***Ключові слова:** інформаційні технології, дешифрування, аерофотознімки, геоінформаційні системи, розпізнавання об'єктів, обробка аерофотоданих, машинне навчання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.154-163>

Вступ

У сучасних умовах бурхливого розвитку інфраструктури міста зросло значення відеоінформації, що надходить із бортів БПЛА, як одного з ключових інструментів інформаційного забезпечення структури управління міським господарством та плануванням. Це зумовлено швидкими змінами в міському середовищі, що, у свою чергу, підвищує вимоги до актуальності та своєчасності даних, отриманих із використанням БПЛА. Особливо важливо це на рівні оперативного управління, де дані з БПЛА посідають одне з провідних місць у системі інформаційної підтримки.

На сьогоднішній день типовими засобами аерофотозйомки є комерційні безпілотики серії DJI Mavic, які отримали широке розповсюдження завдяки поєднанню хороших технічних характеристик (зокрема бортових відеокамер) із доступною вартістю. Застосування таких БПЛА дає змогу отримувати інформацію (відеопотік, фотофіксацію) з високою деталізацією, що суттєво сприяє виявленню об'єктів міської інфраструктури, зразків забудови або скупчень об'єктів. Водночас існує низка проблем, що обмежують ефективність такого застосування, зокрема:

- потреба в планшетних пристроях із високою продуктивністю для аналізу відеозображень у реальному часі;
- складність ідентифікації таких об'єктів оператором, зумовлена впливом людського чинника (кваліфікація оператора, особливості візуального сприйняття);
- часові затримки між моментом отримання даних та їх обробкою, пов'язані з архітектурою системи збереження даних.

Остання проблема зумовлена тим, що інформація, отримана під час аеромоніторингу, зберігається не на планшеті керування, а безпосередньо на бортовому накопичувачі безпілотики. Як наслідок, повноцінне дешифрування аерофотознімків можливе лише після завершення польоту.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває завдання пошуку сучасних рішень, які дозволили б підвищити ефективність дешифрування отриманих матеріалів шляхом скорочення часу на їх обробку.

Отже, важливою науково-прикладною проблемою є підвищення оперативності дешифрування даних аерофотознімків при збереженні високого рівня достовірності виявлення об'єктів міської інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд останніх наукових публікацій демонструє активний розвиток технологій, спрямованих на підвищення оперативності доставки результатів, отриманих з БПЛА. Зокрема, активно впроваджуються методи компресійного кодування, алгоритми кластерного аналізу зображень та інші підходи до оптимізації подання кодованих даних.

Паралельно, з метою забезпечення високої достовірності аерофотоданих, застосовуються технології завадостійкого кодування, а також удосконалюються існуючі методи стиснення інформації.

У випадку розпізнавання об'єктів міської інфраструктури, значну ефективність демонструють алгоритми комп'ютерного зору та методи штучного інтелекту, побудовані на основі штучних нейронних мереж. Ці технології вже досягли значних успіхів у цивільному секторі, зокрема у виявленні людей, предметів, транспорту.

У зв'язку з цим доцільним є впровадження сучасних методів комп'ютерного зору, що базуються на нейронних мережах, у процес виявлення об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках. Подібні технології вже активно використовуються в різних галузях цивільного сектору (наприклад, у містобудуванні, моніторингу навколишнього середовища, сільському господарстві), що підкреслює їхню універсальність та потенціал для застосування в міському моніторингу.

Разом з тим, використання комерційних рішень на основі штучного інтелекту часто потребує значних фінансових вкладень та високопродуктивної обчислювальної інфраструктури. У зв'язку з цим пропонується

використовувати відкриті (некомерційні) технології машинного навчання, які можуть бути адаптовані та вдосконалені для потреб автоматизованого аналізу отриманих даних. Це дозволить створити основу для реалізації систем автоматичного розпізнавання об'єктів міської інфраструктури з можливістю подальшої інтеграції в існуючі засоби обробки аерофотознімків.

Мета роботи. Метою дослідження є визначення ефективних підходів до автоматизації процесу розпізнавання об'єктів міської інфраструктури для підвищення швидкості дешифрування аерофотознімків.

Об'єктом дослідження є процес виявлення та дешифрування об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках, отриманих за допомогою БПЛА, що включає збір, обробку, аналіз та ідентифікацію візуальних даних, де особливістю є використання комп'ютерного зору і технологій штучного інтелекту.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для забезпечення результативної роботи моделі автоматизованого розпізнавання об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках необхідно дотримуватись наступних основних критеріїв:

1. Підвищена швидкодія процесу виявлення об'єктів міської інфраструктури. Однією з ключових вимог до моделі є мінімізація часу обробки вхідного зображення для виявлення об'єктів. Це формалізується наступною умовою, що відображає коефіцієнт оперативності дешифрування (Коп):

$$K_{op} = \frac{T_{etalon}}{T_{факт}},$$

де: T_{etalon} – еталонний (мінімально допустимий) час на виявлення ОМІ на аерофотознімку;

$T_{факт}$ – фактичний час, витрачений запропонованою математичною моделлю на виявлення об'єктів.

Для забезпечення необхідної швидкодії, повинна виконуватися умова ефективності, коефіцієнт оперативності дешифрування повинен бути не меншим за одиницю, тобто: $K_{op} \geq 1$.

2. Високий рівень точності (достовірності) ідентифікації об'єктів. Показник достовірності відображає відсоткове співвідношення правильно розпізнаних об'єктів до загальної кількості об'єктів, поданих для дешифрування.

Розрахунок ведеться за формулою, що визначає індекс достовірності розпізнавання ($I_{дор}$):

$$I_{дор} = \frac{N_{виявл_прав}}{N_{заг\ об'єктів}},$$

де: $N_{виявл_прав}$ – кількість об'єктів міської інфраструктури, коректно ідентифікованих математичною моделлю на тестових аерофотознімках;

$N_{заг\ об'єктів}$ – загальна кількість об'єктів міської інфраструктури, представлених на тестових аерофотознімках.

Для забезпечення високого рівня достовірності, також повинна виконуватися умова ефективності, де індекс достовірності розпізнавання має перевищувати або дорівнювати встановленому мінімально допустимому порогу ($I_{\text{дор}}(\text{мін})$), що визначається специфікою завдань моніторингу, тобто: $I_{\text{дор}} \geq I_{\text{дор}}(\text{мін})$.

З огляду на те, що на сьогодні процес виявлення ОМІ на аерофотознімках, отриманих за допомогою бортових систем аеромоніторингу, встановлених на БПЛА, здійснюється переважно вручну – тобто оператором із використанням власної зорової системи, то можна стверджувати, що швидкість дешифрування значною мірою залежить від таких чинників, як:

- рівень професійної підготовки оператора (практичні навички);
- фізіологічні особливості зору оператора;
- погодні умови під час зйомки;
- параметри польоту БПЛА (висота, швидкість);
- технічні характеристики оптико-електронних систем спостереження.

Кожен із перелічених факторів чинить істотний вплив на якість і точність виявлення об'єктів міської інфраструктури на зображеннях, що впливає на загальну ефективність аналізу даних дешифрування. У зв'язку з цим доцільним є створення математичної моделі, яка дозволить автоматизувати процес дешифрування аерофотознімків. Такий підхід сприятиме забезпеченню відповідності процесу розпізнавання наступним ключовим вимогам:

1. Підвищення швидкодії ідентифікації об'єктів міської інфраструктури, що оцінюється коефіцієнтом прискорення дешифрування ($K_{\text{пр}}$):

$$K_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{існуючий метод}}}{T_{\text{автоматизований метод}}} , \quad (1)$$

де: $T_{\text{існуючий метод}}$ – середній час, необхідний для дешифрування об'єктів за допомогою традиційних (існуючих, наприклад, ручних) методів;

$T_{\text{автоматизований метод}}$ – час, витрачений на дешифрування тих самих об'єктів із використанням запропонованого автоматизованого методу.

Зазначимо, що актуальність цієї вимоги зумовлена суттєвими часовими витратами на аналітичну обробку зображень при використанні класичних методів, що у ряді випадків призводить до втрати оперативності отриманих даних.

2. Досягнення заданого рівня достовірності виявлення об'єктів міської інфраструктури, що характеризується коефіцієнтом підвищення достовірності ($K_{\text{дост}}$):

$$K_{\text{дост}} = \frac{D_{\text{нв}}}{D_{\text{цільової}}} , \quad (2)$$

де: $D_{\text{нв}}$ – досягнутий рівень достовірності розпізнавання об'єктів міської інфраструктури запропонованою математичною моделлю (у відсотках від 1); $D_{\text{цільової}}$ – мінімально допустимий або бажаний рівень достовірності, встановлений для завдань моніторингу.

Варто зазначити, що виконання цих вимог є вкрай важливим, оскільки на сьогоднішній день процес дешифрування аерофотознімків залишається трудомістким та потребує значного часу. Це спричиняє затримки в отриманні

інформації та знижує її оперативну цінність, що критично важливо в умовах нестандартних ситуацій динамічного міського середовища. Забезпечення виконання наведених вимог пропонується реалізовувати шляхом впровадження сучасних алгоритмів комп'ютерного зору в процес дешифрування аерофотознімків. Такий підхід пояснюється тим, що застосування алгоритмів, побудованих на основі технологій штучного інтелекту, створює передумови для значного прискорення розпізнавання ОМІ на зображеннях. Водночас ефективність таких рішень безпосередньо залежить від обсягу й якості навчальних даних: чим більшою є база зразків цільових об'єктів, тим точніше працюватиме система розпізнавання. Для реалізації цієї ідеї зазвичай використовуються згорткові нейронні мережі в комбінації з алгоритмами машинного навчання.

Серед найперспективніших інструментів у цій сфері останнім часом виділяються моделі сімейства YOLO (You Only Look Once), які зарекомендували себе як швидкі, точні та порівняно невибагливі до апаратного забезпечення. Зокрема, моделі п'ятої версії та їхні модифікації демонструють переваги у вигляді:

- високої швидкодії;
- простоти використання;
- низьких обчислювальних вимог під час обробки зображень.

Сучасними платформами для реалізації таких алгоритмів виступають PyTorch та TensorFlow. Зокрема, PyTorch відзначається зручністю, економним використанням пам'яті та гнучкістю, тоді як TensorFlow забезпечує широкі можливості масштабування, підтримку паралельних і розподілених обчислень. Аналіз існуючих підходів дає підстави стверджувати, що алгоритми з родини YOLO є дієвим інструментом для оперативного виявлення ОМІ на зображеннях, що робить їх перспективними для подальшої інтеграції в автоматизований процес дешифрування аерофотознімків. Структурно-функціональна схема запропонованої математичної моделі автоматизованого виявлення об'єктів міської інфраструктури, що включає три основні етапи, представлена на рис. 1.

Етапи реалізації моделі

1-й етап: підготовка до навчання штучної нейронної мережі (ШНМ).

На цьому етапі здійснюється формування навчальної вибірки та класифікатора об'єктів міської інфраструктури. Етап включає такі ключові складові:

- формування бази навчальних даних – створення масиву аерофотознімків зі зразками об'єктів міської інфраструктури, які підлягають розпізнаванню;
- формування класифікатора цільових об'єктів – визначення типів об'єктів (класів), що розпізнаватимуться нейронною мережею.

У загальному вигляді масив тренувальних даних задається виразом:

$$A_{train} = \{A_1, A_2, \dots, A_N\},$$

де: A_{train} – набір аерофотознімків для навчання математичної моделі;

N – загальна кількість знімків у навчальному наборі;

A_i – окремий аерофотознімок з набору.

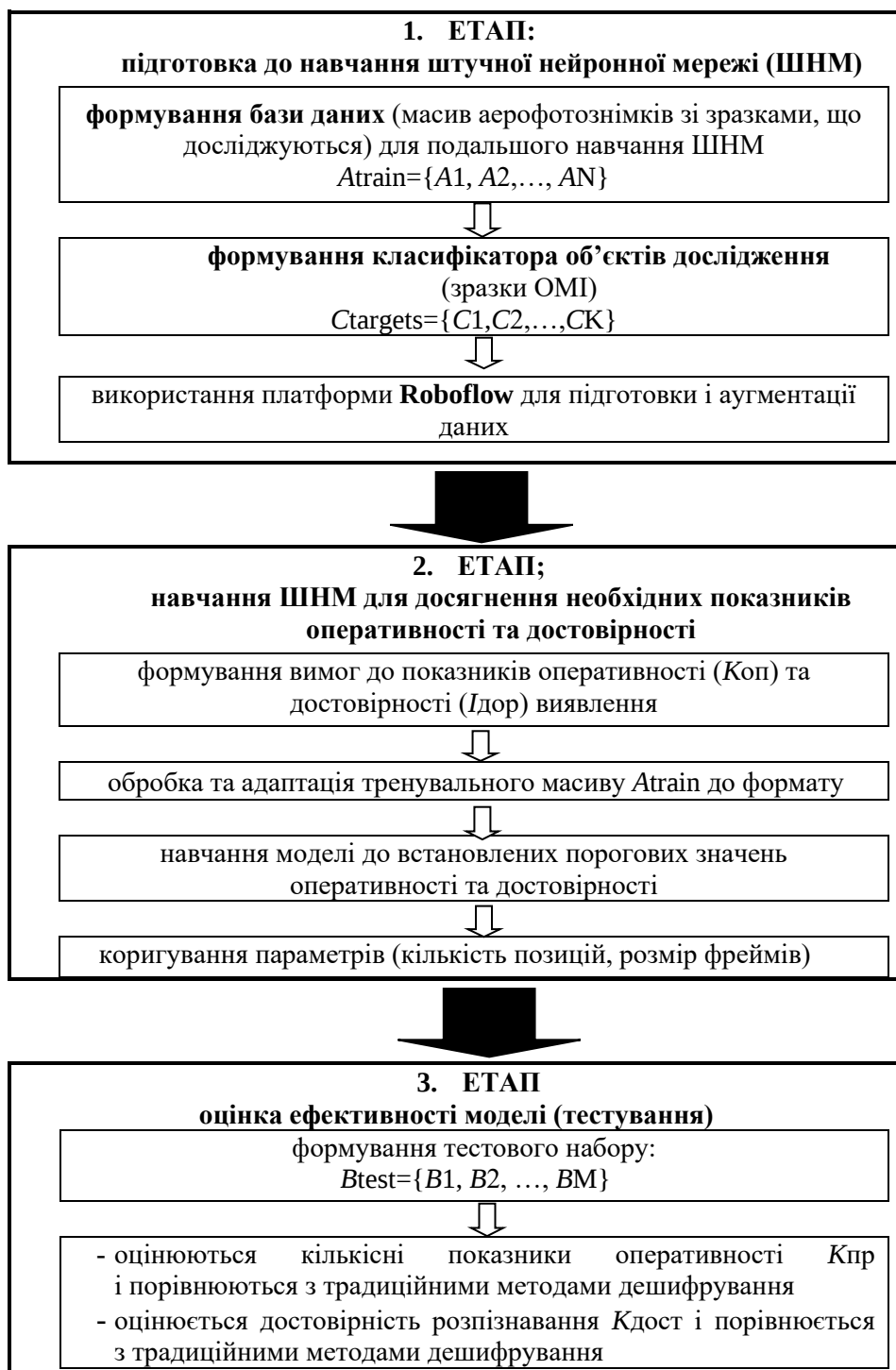


Рис. 1. Структурно-функціональна схема запропонованої моделі автоматизованого виявлення ОМІ

Одним з ключових підходів до збільшення ефективності формування бази є аугментація даних – методика розширення вибірки шляхом внесення трансформацій у зображення (масштабування, обертання). Класи об'єктів визначаються у вигляді множини:

$$C_{\text{targets}} = \{C_1, C_2, \dots, C_K\},$$

де: C_{targets} – множина класів (типів) ОМІ, що підлягають розпізнаванню;

K – кількість унікальних класів об'єктів;

C_j – окремий клас об'єктів.

Для реалізації цього етапу доцільно використати платформу Roboflow – сучасне середовище для створення та обробки наборів даних комп'ютерного зору з відкритим кодом. Її застосування дозволяє значно скоротити час на підготовку якісної вибірки для навчання ШНМ.

2-й етап: навчання нейронної мережі.

Метою цього етапу є налаштування математичної моделі нейронної мережі для досягнення необхідного рівня оперативності та достовірності виявлення цільових об'єктів. Етап включає:

- формалізацію вимог до характеристик роботи математичної моделі: зокрема, до показників оперативності ($K_{\text{оп}}$) та достовірності ($I_{\text{дор}}$) виявлення;
- обробку та адаптацію тренувального масиву Atrain до формату, сумісного з вибраною технологічною платформою (PyTorch або TensorFlow);
- процес навчання математичної моделі, який триває доти, доки не буде досягнуто встановлених порогових значень оперативності та достовірності. Під час тренування коригуються гіперпараметри моделі: кількість епох, розмір пакета, стратегії обробки зображень $A_1, A_2, \dots, A_N$ та інші характеристики навчального процесу. Завершення етапу передбачає отримання зважених параметрів нейронної мережі, що забезпечують відповідність цільовим метрикам, визначеним формулами для $K_{\text{пр}}$ та $K_{\text{дост}}$.

3-й етап: оцінка ефективності моделі (тестування).

На заключному етапі виконується валідація якості роботи математичної моделі на незалежній вибірці тестових даних:

- формується тестовий набір:

$$B_{\text{test}} = \{B_1, B_2, \dots, B_M\},$$

де: B_{test} – набір тестових аерофотознімків;

M – загальна кількість знімків у тестовому наборі;

B_k – окремий тестовий аерофотознімок.

- оцінюються кількісні показники оперативності (коефіцієнт прискорення дешифрування, $K_{\text{пр}}$) виявлення об'єктів на тестових зображеннях і порівнюються з традиційними методами дешифрування;
- оцінюється достовірність розпізнавання (коефіцієнт підвищення достовірності, $K_{\text{дост}}$) за аналогічним принципом.

Запропонована математична модель автоматизації дешифрування аерофотознімків базується на інтеграції сучасних алгоритмів комп'ютерного зору та технологій штучного інтелекту. Її реалізація дозволяє значно підвищити ефективність розпізнавання об'єктів міської інфраструктури, зокрема за рахунок:

1. Скорочення часу обробки аерофотознімків;
2. Зниження впливу людського фактора;
3. Підвищення достовірності та повторюваності результатів дешифрування.

У впровадженні цієї математичної моделі полягає потенціал суттєвого вдосконалення процесу дешифрування інформації в умовах моніторингу міського середовища.

Висновки

У дослідженні розроблено інноваційну концептуальну математичну модель автоматизації дешифрування об'єктів міської інфраструктури на аерофотознімках. Запропонована математична модель, що базується на інтеграції передових алгоритмів комп'ютерного зору та ШІ з відкритим кодом, забезпечує значне підвищення оперативності розпізнавання без додаткових фінансових витрат.

Основною науковою новизною є побудова моделі, яка враховує специфіку урбанізованого середовища та дозволяє в автоматизованому режимі розпізнавати об'єкти різного функціонального призначення (житлову, транспортну, інженерну та комунальну інфраструктуру) – з високим рівнем достовірності. Сформульовано базові вимоги до систем дешифрування в умовах високої мінливості міського ландшафту, а також розроблено структурно-функціональну схему реалізації процесу навчання та тестування штучної нейронної мережі.

Використання даної моделі створює передумови для впровадження автоматизованих систем моніторингу міського середовища, здатних своєчасно виявляти зміни забудови, виявляти потенційні порушення в інфраструктурі, а також підтримувати прийняття рішень у сфері міського управління, безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Перспективи подальшої роботи включають:

1. Накопичення та структуризацію спеціалізованої бази даних аерофотознімків з маркованими об'єктами міської інфраструктури, що враховуватиме динаміку та особливості сучасного міського розвитку;
2. Створення комплексного методу автоматизації дешифрування аерофотознімків з подальшою його програмною реалізацією;
3. Здійснення всебічних експериментальних досліджень, спрямованих на верифікацію ефективності запропонованої математичної моделі за критеріями оперативності та достовірності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebachuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Чижевський, Б. І., Литвиненко, Д. О. (2020). Автоматизація обробки аерофотографій з БПЛА для потреб цивільної інфраструктури. *Сучасні інформаційні технології*, №3(75), 66–72.
3. Міненко, О. В., Яковенко, П. Г. (2021). Комп'ютерний зір у завданнях екологічного моніторингу урбанізованих регіонів. *Екологічні проблеми мегаполісів*, 4(12), 88–94.

4. Абраменко, С. Ю., Носов, П. В. (2022). Застосування нейронних мереж для автоматичного дешифрування об'єктів на супутникових знімках. *Інформаційні технології та системи управління*, 1(41), 34–41.
5. Андреев, С. М., Крета, Д. Л., Радчук, В. В. (2008). Розробка картографічних моделей морських акваторій та прибережних територій з застосуванням геоінформаційних технологій. "Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами з надзвичайних ситуацій": матеріали VII міжнар. наук.-практ. конф. (С. 112–117). Київ – Харків – АР Крим.
6. Триснюк, В., Триснюк, Т., Варавін, Д. (2022). Геомоделі екологічної безпеки урбанізованого середовища в умовах пандемічних загроз на прикладі м. Києва. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування, 1(25), 7–13. DOI: 10.31471/2415-3184-2022-1(25)-7-13
7. Roboflow, Inc. (2023). <https://roboflow.com> – онлайн-платформа для створення та анотації датасетів зображень.

Стаття надійшла до редакції 11.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 01.05.2025

REFERENCES

1. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., & Hlebuchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in the Kharkiv region of Ukraine. In: *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347–352). Springer, Berlin, Heidelberg.
2. Chyzhevskiy, B. I., & Lytvynenko, D. O. (2020). Automation of UAV-based aerial data processing for civil infrastructure needs. *Modern Information Technologies*, (3)75, 66–72.
3. Minenko, O. V., & Yakovenko, P. H. (2021). Computer vision in environmental monitoring tasks of urbanized regions. *Environmental Problems of Megacities*, 4(12), 88–94.
4. Abramenko, S. Yu., & Nosov, P. V. (2022). Application of neural networks for automatic decoding of objects in satellite images. *Information Technologies and Control Systems*, 1(41), 34–41.
5. Andreev, S. M., Kreta, D. L., & Radchuk, V. V. (2008). Development of cartographic models of marine areas and coastal zones using geoinformation technologies. In: *Modern Information Technologies for Managing Environmental Safety, Natural Resource Use, and Emergency Response: Proceedings of the 7th International Scientific-Practical Conference*. Kyiv – Kharkiv – AR Crimea (pp. 112–117).
6. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Varavin, D. (2022). Geomodels of ecological safety of the urban environment under pandemic threats using the example of Kyiv. *Ecological safety and balanced resource use*, 1(25), 7–13. DOI: 10.31471/2415-3184-2022-1(25)-7-13
7. Roboflow, Inc. (2023). Roboflow – Online platform for image dataset creation and annotation. Retrieved from <https://roboflow.com>

The article was received 11.03.2025 and was accepted after revision 01.05.2025

Марущак Василь Миколайович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-9949> **e-mail:** stydjaga.fo.ru@gmail.com

УДК 004.89:519.22

Tetyana Prosyankina-Zharova, PhD, associate professor, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.pruman@gmail.com

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

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS IN REGIONAL DEVELOPMENT MANAGEMENT

Abstract. *The paper is devoted to the current scientific and applied problem – development of information technologies to support decision-making in regional development management. The proposed information technologies are intended for use in state and public administration systems. They can be used separately, but to increase the efficiency of their use, it is proposed to combine them in a single information system for regional development management. The proposed information technologies combine methods of extracting, storing, collecting and processing structured and unstructured data, mathematical modeling, methods of intelligent data analysis, scenario analysis, cognitive modeling, artificial intelligence, geoinformation technologies, information protection tools, etc.*

The implementation of such a system will improve the quality of governance at the level of regions and communities, will allow optimizing analytical processes on the ground, reduce costs for the digitalization of regions, will contribute to the establishment of feedback between regions and the state and between society and the state.

To build and deploy the system, it is proposed to use the Oracle hardware and software platform, which will allow implementing the network-centric concept of the system, solving problems of interoperability and processing large data sets.

To implement the analytical component of the system, in addition to Oracle BI, SAS Institute software was used. Thanks to this, a powerful adaptive data processing subsystem was created, a wide range of models can be built. SAS Institute software integrates well with various development environments, including those available in the public domain, which allows you to expand the system by developing your own modules, in particular, using the Python programming language.

It is envisaged that the system will be scalable. Taking into account the specifics of the system's purpose, a comprehensive information protection system with confirmed compliance is envisaged.

In the future, the system can be expanded by adding new mathematical models and their ensembles, geospatial information processing tools, and artificial intelligence.

Keywords: *decision support system, regional development, information technology, data processing, network-centric approach.*

Т.І. Просянкіна-Жарова

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

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УПРАВЛІННІ РЕГІОНАЛЬНИМ РОЗВИТКОМ

***Анотація.** Стаття присвячена актуальній науково-прикладній проблемі – розробленню інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком. Пропоновані інформаційні технології призначені до використання у системах державного та публічного управління. Вони можуть бути використані окремо, але для підвищення ефективності їх застосування запропоновано поєднати їх у єдиній інформаційній системі управління регіональним розвитком. Пропоновані інформаційні технології поєднують методи видобування, зберігання, збору та оброблення структурованих і неструктурованих даних, математичне моделювання, методи інтелектуального аналізу даних, сценарний аналіз, когнітивне моделювання, штучний інтелект, геоінформаційні технології, засоби захисту інформації тощо.*

Впровадження такої системи підвищить якість урядування на рівні регіонів та громад, дозволить оптимізувати аналітичні процеси на місцях, знизити витрати на цифровізацію регіонів, сприятиме налагодженню зворотного зв'язку між регіонами та державою та між суспільством та державою.

Для побудови та розгортання системи пропонується використовувати апаратно-програмну платформу компанії Oracle, яка дозволить реалізувати мережецентричну концепцію системи, вирішити проблеми інтеоперабельності та оброблення великих масивів даних.

Для реалізації аналітичної складової системи, крім Oracle BI, використано програмне забезпечення компанії SAS Institute. Завдяки чому створено потужну адаптивну підсистему оброблення даних, побудовано широке коло моделей. Програмне забезпечення SAS Institute добре інтегрується з різними середовищами розроблення, в тому числі, наявними у вільному доступі, що дозволяє розширювати систему, розробляючи власні модулі, зокрема, використовуючи мову програмування Python.

Передбачено, що система масштабуватиметься. Враховуючи особливості призначення системи, передбачено наявність комплексної системи захисту інформації з підтвердженою відповідністю.

***Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, регіональний розвиток, інформаційна технологія, оброблення даних, мережецентричний підхід.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.164-184>

Вступ

Регіональний розвиток, як зазначається в Законі України «Про засади державної регіональної політики» [1], це – процес соціальних, економічних, екологічних, гуманітарних та інших позитивних змін у регіонах. «Реформа місцевого самоврядування та територіальної організації влади на засадах децентралізації, яка успішно реалізується, починаючи з 2015 року, створила нові можливості для розвитку територіальних громад. Новий адміністративно-

територіальний устрій та бюджетна децентралізація значно підвищили спроможність місцевого самоврядування», як зазначено в Концепції державної регіональної політики [2]. Реформа децентралізації сприяла не лише посиленню фінансової спроможності місцевого самоврядування, а й зміні адміністративного устрою, підходів до управління регіонами та громадами. Досить високими є темпи муніципальної консолідації, що дає територіальним громадам можливість долати багато викликів, досвіду опрацювання яких вони ще донедавна не мали. Наступними кроками реформ, як це передбачено у Державній стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 рр. [3], є розбудова системи стратегічного планування, інвестиційного забезпечення та фінансування регіонального розвитку. Розв'язання вказаних задач потребує цифрової трансформації та цифрового розвитку, які також визначені пріоритетними напрямками державної регіональної політики [4].

У більшості областей вже розроблені й впроваджуються заходи, передбачені у програмі інформатизації, працює система е-урядування. На початку 2024 року презентовано тестову версію Єдиної геоінформаційної системи здійснення моніторингу та оцінювання розвитку регіонів і територіальних громад [5].

Цифрова трансформація на місцевому та регіональному рівнях триває. Більшість областей вже презентували програми інформатизації. Основна увага приділена здійсненню моніторингу та оцінюванню розвитку регіонів і територіальних громад, е-урядуванню, обслуговуванню населення.

Мало уваги приділено питанням автоматизації процесів підтримки прийняття рішень, організації інформаційної взаємодії місцевого, регіонального та державного рівнів, узгодженню інформаційно-аналітичної роботи, розробленню єдиної концепції збору та накопичення інформації щодо соціально-економічного розвитку громад для забезпечення комплексного, системного підходу до планування, прогнозування, прийняття рішень та аналізу їх ефективності для забезпечення сталого регіонального розвитку. Обласні програми інформатизації розробляються, виходячи з першочергових проблем регіонів, з урахуванням наявних фінансових та технічних можливостей щодо їх реалізації. Однак, за такого підходу, регіони матимуть технологічно різні платформи, різний набір використовуваного програмного забезпечення, організацію зберігання даних та знань тощо. Все це значно знижує інтероперабельність інформаційних технологій, що впроваджуються, знижує потенційні можливості масштабування таких систем.

Тому, у даній роботі запропоновано методику розроблення інформаційних технологій, призначених до використання у системах підтримки прийняття рішень як на рівні регіону, так і на рівні територіальної громади. Пропонована методика вирізняється адаптивністю, масштабованістю, урахуванням невизначеностей різних типів та можливістю дослідження економічних, екологічних, соціальних чинників, що впливають на розвиток громад та регіонів, та особливостей управлінських та інформаційних зв'язків на різних рівнях управління системи «держава-регіон-громада», як в умовах війни, так і у період повоєнного відновлення. Основу запропонованої інформаційної технології становлять сучасні засоби збору та оброблення даних, методи інтелектуального аналізу даних, математичні моделі, штучний інтелект, методи підтримки прийняття рішень.

Зважаючи на те, що інформатизація регіонів та громад триває, потрібні нові, науково обґрунтовані підходи до розроблення систем підтримки прийняття рішень. Тема роботи є актуальною, має практичну цінність та наукову новизну.

Постановка задачі

Метою роботи є розроблення методології створення інформаційної технології аналітичної складової системи підтримки прийняття рішень управління регіоном для забезпечення регіонального розвитку. Основу цієї технології становлять нові інформаційні технології збору, обробки, накопичення великих обсягів структурованої та неструктурованої інформації, математичні моделі, методи інтелектуального аналізу даних та штучного інтелекту, використовувані у складі єдиної адаптивної інтероперабельної аналітичної платформи, побудованої на основі мережецентричного підходу.

Задачі дослідження:

- виконати огляд сучасних підходів, що застосовуються в рамках цифрової трансформації регіонів та громад;
- проаналізувати особливості організації взаємодії складових системи управління регіональним розвитком, запропонувати модель управління, що дозволить підвищити ефективність інформатизації регіонів та громад;
- розробити методику побудови інформаційної технології для підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком;
- зробити висновки щодо можливості її використання у роботі органів місцевого самоврядування та державного управління регіонального рівня;
- запропонувати шляхи покращення та практичного застосування вказаної методики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Система публічного управління активно реформується, адаптуючись до змін, що відбулись внаслідок реформи децентралізації. Здобутки системи публічного управління в Україні відзначені у аналітичному звіті Sigma monitoring reports [6]. Зокрема, це цифрова трансформація публічного управління, розбудова системи електронного урядування. Станом на початок 2024 року, за даними Sigma monitoring reports, Україна впевнено рухається у напрямку цифровізації. Впроваджено ключові механізми електронного урядування, що сприяло покращенню позицій України в Індексі розвитку електронного урядування з 82-го місця у 2018 році до 46-го місця у 2022 році. Позитивною є динаміка використання національної системи електронної взаємодії між державними інформаційними ресурсами, електронними реєстрами, інформаційними системами «Трембіта» [6] – кількість цифрових транзакцій зросла з 62,7 мільйона у третьому кварталі 2021 року до 541,3 мільйона у першому кварталі 2023 року. Кількість користувачів порталу «Дія» досягла близько 1,5 мільйона на день. В Україні діє понад 1100 Центрів надання адміністративних послуг, які пропонують стандартизований набір послуг громадянам та бізнесу [7]. У Збірнику інноваційних практик у державному управлінні та адмініструванні для сталого розвитку, виданому ООН [8], також відзначено досягнення електронного урядування в Україні.

Налагодження роботи Центрів надання адміністративних послуг в територіальних громадах значно покращило обслуговування населення, а також сприяло оперативній актуалізації інформації, що зберігається у державних реєстрах. Впроваджується Національна електронна система управління відбудовою DREAM [9], представлено тестову версію Геоінформаційної системи регіонального розвитку [5]. На регіональному рівні триває розроблення та прийняття регіональних програм інформатизації, запроваджено Єдину інформаційну систему обліку Національної програми інформатизації [10], розроблено Типовий проект регіональної програми, проекту, робіт з інформатизації [11] та Типовий проект програми, проекту, робіт з інформатизації органу місцевого самоврядування [12]. Це, звичайно, потужні кроки в напрямку удосконалення інформаційного забезпечення регіонального розвитку, однак, питання розроблення інформаційних технологій, призначених до використання у системах підтримки прийняття рішень в органах державного управління та місцевого самоврядування на рівні регіону та територіальних громад, поки залишається не вирішеним.

Як показав аналіз інформаційних джерел, основні акценти в сфері державної політики інформатизації регіонального розвитку зроблені на наданні інформаційних, інформаційно-консультативних послуг, моніторингу та оцінюванні розвитку регіонів та територіальних громад.

Розробленню систем підтримки прийняття рішень в управлінні соціально-економічними системами присвячені роботи С. О. Довгого, О. М. Трофимчука та П. І. Бідюка [13], О. П. Гожого, Л. О. Коршевніюка [15], Sugumaran V. [14], Hollsapple C.W., Winston A.B. [15], О. В. Нестеренко, О. І. Савенкова, О. О. Фаловського [16], Borra, S., Dey, N., та ін. [17], M. Sánchez-Marrè [18], І. В. Рубана, В. В. Тютюника, О. О. Тютюника [19], М. А. Павленка, С. В. Осієвського, О. А. Золотухіна [20]. Питання створення спеціалізованих систем підтримки прийняття рішень, зокрема, для ситуаційних центрів, розглянуті в роботах В. Ф. Проскури [21], Н. Е. Кунанця, П. П. Федорка, В. І. Кута [22]. Про важливість забезпечення інтеперабельності інформаційних систем та їх компонентів, зокрема для е-урядування, свідчить значна кількість стандартів та нормативних документів, прийнятих за кордоном [23, 24], у роботах вітчизняних науковців, зокрема О. В. Нестеренка та І. Є. Нетесіна [25]. Забезпечення адаптивності інформаційних технологій, застосовуваних у системах підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, переваги використання єдиного інформаційного простору представлені у роботах В. Зацерковного, П. Савкова та ін. [26], А. Деккера [27], О. О. Головіна [28], Г. М. Потапова, Д. А. Філістєєва та ін. [29], М. Голобородька, Ю. Кондратенка [30].

Незважаючи на значну кількість праць, присвячених питанням інформатизації регіонального розвитку, як в Україні, так і за кордоном [31–41], питанням використання сучасних інформаційних технологій збору та обробки даних, інтелектуального аналізу даних та математичного моделювання у системі управління регіональним розвитком, зокрема, для розв'язання задач формування оптимальної галузевої структури регіону, територіальної громади, в тому числі, при об'єднанні громад, ефективного використання наявного ресурсного та виробничого потенціалу територій приділено мало уваги. Не вирішеним залишається питання забезпечення системного підходу до інформатизації аналітичної складової у процесі підтримки прийняття

рішень під час обґрунтування моделі економічного та соціального розвитку громад та регіонів на поточний момент та на перспективу, зокрема, під час розроблення стратегій, програм, планів регіонального розвитку, визначення оптимального складу об'єднаних територіальних громад та галузевої структури економіки регіону, обґрунтування вибору моделі управління регіональним розвитком, урахування екологічних та суспільно-політичних чинників, можливості масштабування та модернізації існуючої інформаційної системи. Практично відсутні напрацювання стосовно методики формування цілісної системи інформаційно-аналітичного забезпечення регіонального розвитку, що базується на використанні сучасних інформаційних технологій збору та оброблення структурованих та неструктурованих даних, математичних моделей, методів інтелектуального аналізу даних, когнітивного моделювання, штучного інтелекту, геоінформаційних технологій.

Теоретичні основи дослідження

Державна політика України у сфері децентралізації, перший етап якої завершився, вже дала позитивні результати як щодо реформування місцевого самоврядування, так і територіальної організації влади. Державна стратегія регіонального розвитку на 2021-2027 рр. [3] передбачає, що стратегічне планування має враховувати ключові виклики, які впливають на людину, інфраструктуру, безпекове середовище, економіку та навколишнє природне середовище, а також включати побудову культури партнерства та співробітництва, орієнтовану на взаємодію органів державної влади, органів місцевого самоврядування та громадян. Заходи державної регіональної політики, як зазначається в Стратегії [3], мають формуватися на основі набутого досвіду, зібраних даних, висновків, рекомендацій, результатів аналізів та оцінки для забезпечення та підтримки високих стандартів управління та реалізації державної регіональної політики, що потребує функціонування відповідних спеціалізованих аналітичних засобів, баз даних для формування та оцінки результативності цієї політики.

Також зазначається, що державна регіональна політика на період до 2027 року [3] здійснюватиметься на основі комплексного територіально-орієнтованого підходу, який передбачає, що об'єктом у рамках регіональної політики є регіони та територіальні громади, які характеризуються специфічним набором соціальних, просторових, безпекових, екологічних та економічних особливостей. З точки зору теорії системного аналізу [42], регіони є складними соціально-еколого-економічними системами. Такі системи характеризуються адаптивністю, схильністю до самоорганізації, а процеси, що відбуваються в них – складністю, наявністю невизначеностей різних типів, значними обсягами різномірної інформації, що стосується різних предметних областей, стійкими горизонтальними та вертикальними зв'язками між окремими елементами системи.

Чільне місце у системі регіонального розвитку посідають територіальні громади. В ході реформи децентралізації, держава делегувала значну частину повноважень територіальним громадам. Зокрема, це питання утворення об'єднаних громад, визначення напрямів соціально-економічного розвитку, пріоритетності інвестиційних проектів тощо. Маючи такі повноваження, громади, в свою чергу, є об'єктами управління, які мають спільно вирішувати

задачі регіонального розвитку. Така модель управління відповідає мережецентричному підходу, який дозволяє забезпечувати гнучкість процесів управління складними системами, якими, зокрема, є регіони. За мережецентричного підходу, кожна територіальна громада є окремим елементом регіональної системи, який може генерувати та отримувати інформацію, приймати рішення на основі отриманої інформації та ситуації, що складається, самоорганізовуватись, виконувати задачі регіонального розвитку в межах власних повноважень, відповідно до програм, планів, стратегій розвитку громад та регіонів. Тобто, фактично, регіональний розвиток відбувається у розподіленому інформаційному середовищі, кожний вузол якого – громада, має ситуаційну обізнаність, здатний до самоорганізації та прийняття рішень щодо використання наявних ресурсів та забезпечення сталого функціонування.

Цифрова платформа має відтворювати мережецентричну модель керування складною системою – регіоном. Домени, що утворюють мережецентричне середовище – фізичний, інформаційний та домен знань – взаємодіють між собою, створюючи синергетичний ефект.

Складність створення аналітичного інструментарію, систем підтримки прийняття рішень для регіонального рівня пов'язана з необхідністю урахування значної кількості специфічних факторів, зокрема особливостей життєвого циклу регіону (громади) як конкретної соціально-еколого-економічної системи, її структури, моделі управління, територіального розташування, внутрішніх зв'язків та зв'язків з іншими системами, суспільно-політичних чинників, зовнішніх та внутрішніх впливів різного характеру, а також можливістю передбачення проблемних ситуацій, сценаріїв перебігу подій, наслідків та потенційних ризиків.

Крім того, побудова інформаційно-аналітичних систем для органів державного управління та місцевого самоврядування врегульована на законодавчому рівні, встановлено набір показників, які підлягають моніторингу та аналізу. Кожний регіон, як зазначається у Програмі інформатизації [4, 10–11], має представити власну програму інформатизації, яка б охоплювала напрямки, пріоритетні саме для нього. Але, за такого підходу, втрачається системність. Регіональний рівень управління розглядається відокремлено, з перенесенням акцентів на вирішення точкових, внутрішніх проблем громад регіону. Розроблення системи в цьому випадку здійснюється, орієнтуючись на поточну ситуацію та наявний ресурсний потенціал, а не на визначення шляхів економічного зростання, орієнтованих на перспективу. Потреба в інвестиціях планується, виходячи з необхідності виконання окремих програм чи проектів, часто, навіть привабливих на поточний момент, але таких, що не забезпечуватимуть ні спроможність територіальних громад на перспективу, ні подальший регіональний розвиток.

Значними є ризики того, що реалізація програм інформатизації для регіонів та громад буде різною за концепцією, якістю реалізації, набором реалізованих функцій, не масштабованою та не відповідатиме в повному обсязі вимогам інтероперабельності.

Також, потребує вирішення проблема уніфікації інформаційних технологій збору, оброблення та зберігання значних обсягів різномірної та неструктурованої інформації, забезпечення її захисту та надійного передавання між вузлами системи, відповідно до чинних вимог [43].

Тому, у роботі пропонується системне використання уніфікованого набору інформаційних технологій, об'єднаних у єдиний інформаційній системі регіонального розвитку, побудованій за мережецентричним принципом на основі інтероперабельності, застосування комплексної системи захисту інформації з підтвердженою відповідністю.

Методика дослідження

Дослідження виконано на матеріалах сайтів обласних військових адміністрацій, територіальних громад, Міністерства розвитку громад та територій України [12], Міністерства цифрової трансформації України [44], Державної служби статистики України [45], сайту EU4DIGITAL [46], Державного веб-порталу бюджету для громадян [47] та порталу «Відкрити дані» [48]. Використано дані, що знаходяться у відкритому доступі та стосуються соціально-економічного розвитку регіонів та громад.

Задача розроблення інформаційної технології управління регіональним розвитком розглядається як з точки зору забезпечення реалізації якісної аналітичної підсистеми, так і мінімізації витрат на забезпечення реалізації та впровадження, можливості забезпечення роботи з її складовими для посадовців, які не мають навичок аналітичної діяльності.

Специфічними аспектами пропонованої системи є необхідність забезпечення узгодженої взаємодії органів державного управління, місцевого самоврядування, підприємств, установ, організацій, розташованих на певній території, забезпечення моніторингу всіх етапів циклу управління регіональним розвитком від формування планів та стратегій до аналізу результативності системи управління регіоном та підтримки прийняття рішень у кризових ситуаціях.

Система має функціонувати, використовуючи наявні організаційні структури регіонального рівня та рівня територіальних громад, мати уніфіковану реалізацію на місцях, єдине методичне, правове, апаратно-технічне та програмне забезпечення. Система має використовувати єдиний інформаційний простір, користувачі якого мають доступ до баз даних та знань, використовуючи єдину комп'ютерну мережу. Комп'ютерна мережа повинна забезпечувати спільне використання ресурсів та хмарних сервісів, а також захист даних, які не перебувають у вільному доступі. Система має функціонувати як геопросторова розподілена інформаційна система, бути сумісною з інформаційно-аналітичними системами міністерств та органів державного управління відповідного рівня.

Тому, пропонується використовувати мережецентричний підхід створення інформаційних систем, який показав свою ефективність у інформаційних системах військового призначення та системах корпоративного управління. Досвід використання мережецентричних управлінських систем, активне розроблення міжнародних стандартів щодо їх функціонування свідчить про перспективність даного підходу. При побудові такої системи вирішується проблема інтероперабельності взаємодії складових системи – адже складові функціонують на основі єдиної методики, використовуючи єдині стандарти.



Рисунок 1. Схема мережецентричного управління регіону

Мережецентричний підхід за своєю суттю відповідає моделі управління регіональним рівнем соціально-економічної системи країни. Цілеспрямована взаємодія складних систем нижчого рівня – територіальних громад – здійснюється на основі принципів самоорганізації та створює синергетичний ефект від взаємодії. Складові системи автономні – громади, райони, регіони, функціонують в єдиному інформаційному просторі, мають свої цілі, пріоритети, можуть існувати за рахунок власних ресурсів, встановлювати як вертикальні, так і горизонтальні зв'язки. Крім того, мережецентрична модель відтворює фрактальність регіональних соціально-економічних систем, що створює передумови для розроблення типових програмно-апаратних рішень, що об'єднані організаційно та технічно на основі єдиного інформаційного середовища. Основою для розроблення інформаційних технологій є державні стандарти України, технічні вимоги та методи забезпечення інтероперабельності і сумісності наборів геопросторових даних та геоінформаційних сервісів [5], документи консорціуму NCOIC щодо проектування мережецентричних інформаційно-управляючих систем, зокрема модель оцінки інтероперабельності системи SCOPE-модель, керівництво з забезпечення мінімального рівня інтероперабельності MLI та керівництво по забезпеченню інтероперабельності NIF [24]. Важливою складовою розроблюваної інформаційної технології є комплексна система захисту інформації, яка включає програмно-апаратні та програмні засоби технічного та криптографічного захисту інформації, необхідні для забезпечення належного рівня захищеності інформаційних ресурсів системи, побудована згідно із законодавчо встановленими вимогами та має атестат відповідності.

Модель системи управління регіональним розвитком за мережецентричного підходу може бути представлена у вигляді моделі ієрархічної системи управління наступним чином (рис. 2).

Найвищий рівень (G) – визначає цільову настанову системи – забезпечення визначених значень показників регіонального розвитку. На наступному – нижчому рівні ієрархії розглядається районний рівень управління (R, райони, кількість n), підсистема, якою керують. Її цільова настанова (E) – забезпечення

сталого розвитку відповідно до найкращих показників. Підсистеми G та R обмінюються інформацією стосовно стратегії керування, система вищого рівня (G) отримує інформацію про стан та функціонування системи нижчого рівня (R), коригує команди управління для об'єктів, що знаходяться на нижчому рівні (R), і, відповідно до зміни ситуації, коригує власні настанови. Найнижчий рівень – рівень територіальної громади (D, їх кількість різна для кожного району від 1 до z). Його ціль – забезпечення добробуту жителів громади. У процесі функціонування, системи, що знаходяться на одному рівні управління, обмінюються інформацією, отримують настанови (I_n), повідомляють результати (I_r), коригують свою політику: система самоорганізується, адаптуючись до умов поточної ситуації, формуючи при цьому єдиний інформаційний простір. Перевагою такої моделі є самостійність її ланок, оперативність прийняття рішень в умовах невизначеності та швидкої зміни ситуації, що особливо актуально в умовах війни. За такої побудови інформаційної системи, актуальною є проблема забезпечення інтероперабельності, оскільки мережецентрична архітектура передбачає, що всі елементи системи можуть обмінюватись інформацією «напрямую» один з одним.

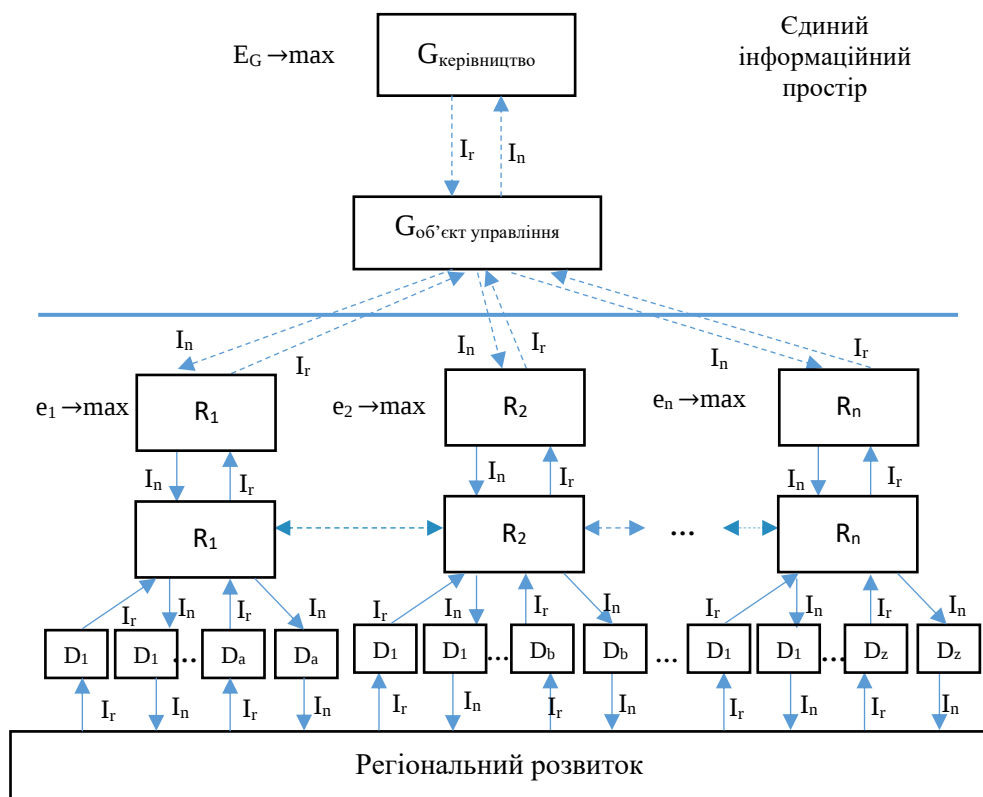


Рисунок 2. Архітектура мережецентричної системи регіонального розвитку

Побудова інформаційних технологій управління регіональним розвитком за мережецентричним принципом забезпечить:

- узгодженість стратегій та програм розвитку регіонів та громад;
- сумісність технологічного, інформаційного, програмного забезпечення;
- системність моніторингу соціально-економічного розвитку регіону;
- об'єктивність інформації, що використовується у системі;
- оперативність та обґрунтованість рішень органів місцевого самоврядування та державного управління;
- доступність інформації для внутрішніх користувачів системи та населення, а також інших зацікавлених сторін із розмежуванням доступу до неї залежно від типу користувачів та їх повноважень у системі.

Інформаційна технологія підтримки прийняття рішень управління регіональним розвитком пропонується до використання у складі єдиної інформаційно-аналітичної платформи управління регіональним розвитком, до складу якої мають увійти Національна електронна система управління відбудовою DREAM, геоінформаційна система регіонального розвитку, документообіг має забезпечувати система електронної взаємодії органів виконавчої влади, забезпечувати електронну взаємодію між державними інформаційними ресурсами, електронними реєстрами, інформаційними системами має система «Трембіта». Формування єдиного інформаційного простору ставить вимоги до інтероперабельності складових системи та забезпечення оброблення значних обсягів даних, забезпечення їх зберігання та спільного використання на різних рівнях органів державного управління та місцевого самоврядування. Тому, для реалізації поставлених задач, пропонується використовувати апаратно-програмну платформу Oracle [49]. Дане програмне забезпечення добре інтегрується із програмними продуктами інших вендорів, середовищами розробки програмного забезпечення, і за своїми характеристиками є оптимальним для розв'язання більшості завдань у системі підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком.

Оскільки значна увага приділяється роботі з даними, то для розв'язання цієї задачі пропонується застосувати конвергентний підхід до організації збору, оброблення та зберігання даних. Тобто, має бути сформована система, центральною частиною якої є центр оброблення даних, а складовими – система обміну даними між компонентами, хмарні сервіси. Дані для аналізу використовуватимуться не лише з аналітичного сховища (пропонується інтеграція Hadoop та ETL/ELT, хмарні сховища), а й в результаті виконання API-запитів, в тому числі, коли потрібно здійснювати обробку даних у режимі реального часу.

Для когнітивного, економетричного, математичного моделювання, інтелектуального аналізу даних, використання штучного інтелекту тощо та представлення результатів у формі документів та дашбордів пропонується використання спеціалізованого програмного забезпечення Oracle BI, аналітичної платформи компанії SAS Institute [50] тощо.

Користувачі системи мають бути розподілені за групами, які мають різні задачі, повноваження та права доступу. Для забезпечення надійності віддаленого доступу, взаємодії між користувачами різних рівнів, надання їм доступу відповідно до повноважень та прав, крім системи кібербезпеки, система повинна мати підсистеми та адміністрування.

Результати дослідження

В результаті даного дослідження запропоновано використовувати інформаційні технології для систем підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком в рамках єдиного інформаційного середовища, створеного на єдиній програмно-апаратній платформі, побудованій мережецентричною архітектурою. Вказані інформаційні технології охоплюють всі етапи підтримки прийняття рішень: від збору та оброблення даних до проекту прийняття рішення як на рівні громади, так і регіону. Загальна схема застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком представлена на рис. 3.



Рисунок 3. Загальна схема застосування інформаційних технологій прогнозування регіонального розвитку

Особливістю запропонованої методики є те, що у підсистемі аналітичної обробки та підготовки даних передбачено виконання SWOT та PEST-аналізу, а побудова моделей може виконуватись як в рамках конкретного сценарію (сценаріїв), так і до сценарію можна долучити необхідні моделі, в тому числі економетричні, математичні, геопросторові, когнітивні та ймовірнісно-статистичні тощо. База знань системи використовується як при побудові сценаріїв, так і в процесі формування проекту рішення. База моделей нарощуватиметься у процесі використання. Для розв'язання задачі побудови моделей та прогнозів, засоби бізнес-аналітики компанії Oracle пропонується доповнити програмним забезпеченням компанії SAS Institute, яке реалізує

широкий набір аналітичних інструментів, має зручний інтерфейс, який дозволяє користувачу власноруч будувати потрібну технологічну схему (без написання програмного коду) та завантажувати необхідні дані. Для рівня громади і регіону пропонується використовувати типовий набір моделей за розробленими типовими схемами аналітичних процесів, які, за потреби, можуть бути адаптовані до особливостей конкретних вирішуваних задач.

Дані для побудови моделей та прогнозів за потреби, можуть бути завантажені як структуровані (таблиці, файли баз даних, текстові файли тощо), так і не структуровані (текст звернень, скановані зображення, фото тощо). Використання засобів Oracle BI дозволяє інтегрувати та обробляти структуровані та неструктуровані дані для безпосереднього використання при побудові моделей та прогнозів та обробляти та накопичувати у базі даних або хмарних сховищах. Завантаження даних в систему побудови моделей та прогнозів може здійснюватися безпосередньо зі сховищ системи – бази даних та хмарного сховища. Або, дані можуть бути завантажені, використовуючи API зовнішніх джерел. Наприклад, інформація з бази даних бюджетів територіальних громад, відомості з державних реєстрів, дані державних установ, міністерств, відомств можуть бути завантажені, використовуючи систему електронної взаємодії «Трембіта», і підготовлені до використання у системі моделювання та прогнозування. Саме етап роботи є чи не найскладнішим з точки зору забезпечення інтеоперабельності системи. На цьому етапі на семантичному рівні моделі інтеоперабельності має бути забезпечена узгодженість змістовного наповнення інформації стосовно функціонування громад та регіонів з наявними статистичними даними та даними звітності територіальних громад, підприємств, установ таким чином, щоб уникнути дублювання, надлишковості даних з одного боку, а з іншого – отримати відомості, що в повній мірі описують стан та динаміку регіонального розвитку. На організаційному рівні має бути узгоджена та закріплена нормативними актами, угодами тощо взаємодія між різними гілками публічного та державного управління, а також взаємодія бізнесу та держави, організована робота із зверненнями громадян та розроблена методика їх аналізу та його використання у роботі органів місцевого самоврядування та публічного управління. На технічному рівні пропонується використання єдиної апаратно-програмної платформи та узгодження протоколів, процедур та форматів представлення та передавання даних, призначених до використання у системі управління регіональним розвитком.

Оброблення даних про стан та динаміку територіальних громад виконується на різних рівнях ієрархії «громада-регіон-держава». На кожному з рівнів обробляється та частина інформації, яка відповідає рівню управлінських рішень. На рівні громади, звичайно, найчастіше використовуваними є дані щодо її функціонування, однак, для виявлення «вузьких місць», визначення перспектив розвитку на рівні громади доцільно порівнювати показники соціально-економічного розвитку громади з кращими для громад аналогічного типу. Для цього необхідно забезпечити доступ до результатів узагальнення даних, які може отримати фахівець відповідного рівня, звернувшись з запитом до бази даних. Для цього у системі є модуль роботи з даними інших громад та регіонів, скориставшись яким, користувач може власноруч задати параметри для класифікації об'єктів або вибрати наявний варіант типологізації.

Загальна (спрощена) схема застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком (рис. 4).



Рисунок 4. Загальна (спрощена) схема застосування інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком

Такий підхід дозволить опрацювати великі обсяги даних, врахувати досвід різних регіонів та громад, якнайкраще урахувати особливості соціально-економічного розвитку територій, оцінити наявний ресурсний потенціал регіонів і громад та перспективи його використання, політичну та фінансову ситуацію в Україні. Це, у свою чергу, сприятиме оптимізації системи розробки макроекономічних прогнозів, оскільки за функціонування єдиного інформаційного середовища управління регіональним розвитком буде доступно більше актуальної інформації. Запровадження сценарного підходу та когнітивного моделювання у поєднанні з вже досить широко використовуваними при побудові регіональних стратегій та програм

SWOT- та PEST-аналізу значно підвищить обґрунтованість управлінських рішень. Адже невід'ємною складовою такого підходу є попередній аналіз предметної області, відбір альтернатив та формулювання цільових установок можливих варіантів розвитку подій. Використання засобів текстової аналітики, штучного інтелекту, геопросторових моделей як інструментів оптимізації підтримки прийняття рішень у задачах багатокритеріального вибору, якими є задачі управління розвитком соціально-економічних систем регіону (громади), дозволяє якнайповніше відібрати альтернативи та визначити цільову настанову розвитку системи (за потреби, формування пропозицій щодо складу об'єднаної громади) за допомогою запропонованої інформаційної моделі, яка узагальнює знання щодо структурних елементів системи, зв'язків між ними та впливу зовнішнього середовища, узгодити експертні оцінки, формалізувати нечіткі уявлення щодо розвитку територій, визначити орієнтири її розвитку на певних часових проміжках в межах розроблених сценаріїв.

Висновки

У роботі запропоновано нову методологію побудови інформаційних технологій підтримки прийняття рішень в управлінні регіональним розвитком, яка вирізняється застосуванням конвергентного підходу до розроблення інформаційно-аналітичної платформи, мережецентричною архітектурою, використанням уніфікованих рішень та єдиного інформаційного простору. Розробка призначена для використання у системі органів державного та публічного управління, місцевого самоврядування для вирішення задач управління регіональним розвитком. Запропоновано реалізацію єдиної інформаційно-аналітичної системи управління регіональним розвитком шляхом інтеграції аналітичних платформ SAS та Oracle BI на базі апаратно-програмного забезпечення компанії Oracle.

Використання пропонованої системи забезпечить скорочення часу на оброблення значних обсягів даних (структурованих та неструктурованих) та дозволить отримувати результати аналізу та прогнозування високої якості у режимі реального часу, що покращить якість управлінських рішень як на рівні регіону, так і громади. Крім того, використання єдиного рішення дозволить скоротити витрати на реалізацію програм інформатизації у регіонах, посилить зв'язки між регіонами та громадами, дозволить покращити аналітичну складову місцевого та регіонального управління.

В подальшому система може бути розширена за рахунок додавання нових математичних моделей та їх ансамблів, засобів обробки геопросторової інформації та штучного інтелекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Про засади державної регіональної політики. Закон України № 156-VII (2015). (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-19#Text> (in Ukrainian).
2. Про Концепцію державної регіональної політики. Указ Президента України. №341/2001 (2001). (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/341/2001#Text> (in Ukrainian).
3. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки. Постанова Кабінету Міністрів України № 685 (2020). (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-п#Text> (in Ukrainian).

4. Про деякі питання Національної програми інформатизації. Постанова Кабінету Міністрів України №119 (2024). (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/119-2024-п#Text> (in Ukrainian).
5. Про затвердження Порядку функціонування єдиної геоінформаційної системи здійснення моніторингу та оцінювання розвитку регіонів і територіальних громад. Постанова Кабінету Міністрів України №522 (2025). (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/522-2023-п#Text> (in Ukrainian).
6. SIGMA Monitoring Reports. (2024, лютий 6). SIGMA. <https://www.sigmaxweb.org/publications/monitoring-reports.htm> (in Ukrainian).
7. *Матеріали*. <https://trembita.gov.ua>. Система електронної взаємодії державних електронних інформаційних ресурсів «Трембіта» (in Ukrainian).
8. *United Nations Department of Economic and Social Affairs. Compendium of innovative practices in public governance and administration for sustainable development* (2016). UN-iLibrary. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
9. *Цифрова екосистема для підзвітнього управління відновленням DREAM*. <https://dream.gov.ua/ua> (in Ukrainian).
10. *Єдина інформаційна система обліку Національної програми інформатизації*. <https://npi.gov.ua> (in Ukrainian).
11. Затверджено типові проекти програм інформатизації для регіонів та територіальних громад. (2024, листопад 14). *Єдина інформаційна система обліку НПП*. <https://npi.gov.ua/ua/news/77> (in Ukrainian).
12. *Офіційний сайт Міністерства розвитку громад та територій України*. <https://mtu.gov.ua> (in Ukrainian).
13. Довгий, С. О., Бідюк, П. І. & Трофимчук, О. М. (2020). Системи підтримки прийняття інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 4(69). 131-139. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.044031> (in Ukrainian).
14. Sugumaran, V. (2002). *Intelligent Support System Technology*. London: IRM Press.
15. Hollsapple, C. W., & Winston, A. B. (1996). *Decision support systems*. Saint Paul: West Publishing Company.
16. Нестеренко, О. В., Савенков, О. І., & Фаловський, О. О. (2019). *Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень* (П. І. Бідюк, Ред.). Київ. Національна академія управління (in Ukrainian).
17. Borra, S., Dey, N., Bhattacharyya, S., & Bouhlef, M. S. (2019). *Intelligent decision support systems: Applications in Signal Processing*. Berlin, Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110621105>
18. Sánchez-Marré, M. (2022). *Intelligent Decision Support Systems*. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-87790-3>
19. Рубан, І. В., Тютюнник, В. В. & Тютюнник, О. О. (2021). Особливості створення системи підтримки прийняття антикризових рішень в умовах невизначеності вхідної інформації при надзвичайних ситуаціях. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*, 1(40), 75-84. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84> (in Ukrainian).
20. Павленко, М. А., Осієвський, С. В., & Золотухіна, О. А. (2014). *Модель підтримки процесів розробки рішень на основі статистично-ймовірнісних методів*. Київ: Логос. (in Ukrainian).
21. Проскура, В. Ф. (2016). Інтегрований підхід до створення регіональної інформаційної системи ресурсного забезпечення. *Науковий вісник Мукачівського державного університету, Серія Економіка*, 2(6), 143-147 (in Ukrainian).
22. Кунанець, Н. Е., Федорка, П. П. & Кут, В. І. (2023). Формування рекомендаційної системи для «Розумного регіону» з метою обрання інформаційних технологій та їх реалізацій при створенні застосунків. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології, 1 (9), 33-40. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.05> (in Ukrainian).

23. Технічні вимоги та методи забезпечення інтероперабельності і сумісності наборів геопросторових даних та геоінформаційних сервісів. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України № 347 (2021). (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0024-22#Text> (in Ukrainian).
24. *Дорожня карта розвитку національної інтероперабельності*. Прозорість та підзвітність у державному управлінні та послугах. https://tapas.org.ua/wp-content/uploads/2019/03/Interoperability_Road_Map.pdf (in Ukrainian).
25. Нестеренко, О. В., & Нетесін, І. Є. (2012). Про інтероперабельність компонентів автоматизованих інформаційно-аналітичних систем. *Правова інформатика*, (34), 3-12 (in Ukrainian).
26. Зацерковний, В., Савков, П., Пампуха, І. & Синявська, І. (2020). Оцінка переваг мережецентризму та мережецентричних технологій для розбудови Збройних Сил України. *Технічні науки та технології*, 3 (21), 163-184. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-163-184](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-163-184) (in Ukrainian).
27. Dekker, A. (2008). A Taxonomy of Network Centric Warfare Architectures. Defence Science & Technology Organisation. <https://csl.armywarcollege.edu/SLET/mccd/CyberSpacePubs/NCW%20Taxonomy.pdf>
28. Головін, О. О. (2018). Єдиний інформаційний простір – основа ефективної реалізації принципів програмно-цільового планування розвитку озброєння та військової техніки. *Наука і техніка повітряних сил збройних сил України*, 2 (31), 41-46 (in Ukrainian).
29. Потапов, Г. М., Філістєєв, Д. А., Приходнюк, В. В., Гордєєв, А. Ю. & Фурман, О. А. (2020). Функціональні характеристики мережецентричної онтографічної інформаційної системи специфічного призначення. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, 3 (68), 41-54. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.034154> (in Ukrainian).
30. Holoborodko, M., & Kondratenko, Y. (2025). Мережецентричний підхід до побудови інформаційної інфраструктури: принципи та переваги. *Theoretical and practical aspects of the formation of scientific (с. 116-120)*. Рига: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-536-5-28> (in Ukrainian).
31. Ляхович, Г. І., Жекалло, Г. І. & Вакун, О. В. (2023). Комунікація органів місцевого самоврядування із громадянами в умовах цифровізації: досвід Чехії. *Наукові інновації та передові технології*, 10 (24), 137-149. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-10\(24\)-137-149](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-10(24)-137-149) (in Ukrainian).
32. Богуславська, С. (2023). Упровадження інформаційних систем регіонального менеджменту для забезпечення повоєнного відновлення економіки України. *Економічний аналіз*, 33(3), 79-87. <https://doi.org/10.35774/econa2023.03.079> (in Ukrainian).
33. Department of Economic and Social Affairs. (2024). *E-Government survey 2024. Accelerating digital transformation for sustainable development*. New York: United Nations.
34. Кошель, А. О., Кошель, Д. О., & Кемпа, О. Геоінформаційне забезпечення стратегічного планування та моніторингу регіонального розвитку України в умовах воєнного стану. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2098124> (in Ukrainian).
35. Dumitrescu Peculea A., & Chitescu R. I. (2015). The role of decision support systems (DSS) in the optimization of public sector management. *Corporate governance*, 137-141. <https://doi.org/10.15308/finiz-2015-137-141>
36. Peignot, J., Peneranda, A., Amabile, S. & Marcel G. (2013). The Use of Information Systems on the Decision-making and Performance Management of Local Government. *International Business Research*; 6 (2). <https://doi.org/10.5539/ibr.v6n2p92>. с 92-100
37. Patterson, E., & Agarwal, R. (2023). Reducing the gap between rhetoric and reality: Use of Digital Service Standards for public service innovation through digital transformation in Australia. *Australian Journal of Public Administration*, 82, 557–589. <https://doi.org/10.1111/1467-8500.12615>

38. *Innovations in public governance*. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/projects-and-activities/innovations-public-governance_en An official website of the European Union. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
39. Haug, N., Dan, S. & Mergel, I. (2024). Digitally-induced change in the public sector: a systematic review and research agenda. *Public Management Review*, 26 (7), 1963-1987. <https://doi.org/10.1080/14719037.2023.2234917>
40. Gomes Rêgo De Almeida P., Mota Fernandes L., de Oliveira Ribas M., Gomes Pessoa D., Aquino M. G. & Denner C. (2022). Trajectories and challenges for data governance implementation in the public sector: a systematic review. *Encontro da ANPAD*, 1-28.
41. Xanthopoulou, P., Antoniadis, I., & Avlogiaris, G. (2023). Unveiling the drivers of digital governance adoption in public administration. *Problems and perspectives in management*, 21(4), 454-467. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21\(4\).2023.35](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21(4).2023.35)
42. Панкратова, Н. Д. (2005). *Системный анализ. Теория та застосування*. Київ: Наукова думка (in Ukrainian).
43. *Вимоги до захисту інформації в інформаційних системах у воєнний час: Державна служба спеціального зв'язку та захисту інформації України*. (2022, липень 19). <https://cip.gov.ua/ua/news/vimogi-do-zakhistu-informaciyi-v-informaciinikh-sistemakh-u-voynennii-chas-roz-yasnennya-derzhspeczv-yazku> (in Ukrainian).
44. *Регіони*. <https://thedigital.gov.ua/regions/news>. Міністерство цифрової трансформації України. Офіційний веб-сайт (in Ukrainian).
45. *Публікації*. <https://www.ukrstat.gov.ua> Державної служби статистики України. Офіційний веб-сайт (in Ukrainian).
46. *Україна*. <https://eufordigital.eu/ru/countries/ukraine/>. EU4DIGITAL (in Ukrainian).
47. *Державний веб-порталу бюджету для громадян*. <https://openbudget.gov.ua>. Open budget (in Ukrainian).
48. *Набори даних*. <https://data.gov.ua/dataset>. <https://data.gov.ua> (in Ukrainian).
49. *Обладнання та програмне забезпечення*. <https://www.oracle.com/ua/applications/>. Офіційний сайт компанії Oracle.
50. *Data and AI Solutions*. https://www.sas.com/ru_ua/home.html. Офіційний сайт компанії SAS Institute.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2025 і прийнята до друку після рецензування 10.05.2025

REFERENCES

1. Pro zasady derzhavnoi' regional'noi' polityky. Zakon Ukrai'ny № 156-VII (2015). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/156-19#Text> [in Ukrainian].
2. Pro Konceptiju derzhavnoi' regional'noi' polityky. Ukaz Prezydenta Ukrai'ny. №341/2001 (2001). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/341/2001#Text> [in Ukrainian].
3. Pro zatverdzhennja Derzhavnoi' strategii' regional'nogo rozvytku na 2021-2027 roky. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrai'ny №685 (2020). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-p#Text> [in Ukrainian].
4. Pro dejaki pytannja Nacional'noi' programy informatyzacii'. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrai'ny. №119 (2024). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/119-2024-p#Text> [in Ukrainian].
5. Pro zatverdzhennja Porjadku funkcionuvannja jedynoi' geoinformacijnoi' systemy zdijsnennja monitoryngu ta ocinjuvannja rozvytku regioniv i terytorial'nyh gromad.. Postanova Kabinetu Ministriv Ukrai'ny №522 (2025). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/522-2023-p#Text> [in Ukrainian].
6. SIGMA Monitoring Reports. (2024, lutyj 6). SIGMA. Retrieved from <https://www.sigmaxweb.org/publications/monitoring-reports.htm> [in Ukrainian].

7. Materialy. <https://trembita.gov.ua>. Systema elektronnoi' vzajemodii' derzhavnyh elektronnyh informacijnyh resursiv «Trembita» [in Ukrainian].
8. United Nations Department of Economic and Social Affairs. Compendium of innovative practices in public governance and administration for sustainable development (2016). UN-iLibrary. Retrieved from <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
9. Cyfrova ekosystema dlja pidzvitnogo upravlinnja vidnovlennjam DREAM. Retrieved from <https://dream.gov.ua/ua> [in Ukrainian].
10. Jedyna informacijnu systemu obliku Nacional'noi' programy informatyzacii'. Retrieved from <https://npi.gov.ua> [in Ukrainian].
11. Zatverdzheno typovi proekty program informatyzacii' dlja regioniv ta terytorial'nyh gromad. (2024, lystopad 14). Jedyna informacijna systema obliku NPI. Retrieved from <https://npi.gov.ua/ua/news/77> [in Ukrainian].
12. Oficijnyj sayt Ministerstva rozvytku gromad ta terytorij Ukrai'ny. Retrieved from <https://mtu.gov.ua> [in Ukrainian].
13. Dovgyj, S. O., Bidjuk, P. I. & Trofymchuk, O. M. (2020). Systemy pidtrymky pryjnattja intelektual'nyh system pidtrymky pryjnattja rishen'. *Telekomunikacijni ta informacijni tehnologii*, 4(69), 131-139. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.044031> [in Ukrainian].
14. Sugumaran, V. (2002). Intelligent Support System Technology. London: IRM Press.
15. Hollsapple, C. W., & Winston, A. B. (1996). Decision support systems. Saint Paul: West Publishing Company.
16. Nesterenko, O. V., Savenkov, O. I., Falovs'kyj, O. O. (2019). Intelektual'ni systemy pidtrymky pryjnattja rishen' (P. I. Bidjuk, Ed.). Kyi'v. Nacional'na akademija upravlinnja [in Ukrainian].
17. Borra, S., Dey N., Bhattacharyya, S., & Bouhlef, M. S. (2019). Intelligent decision support systems: Applications in Signal Processing. Berlin, Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110621105>
18. Sánchez-Marré, M. (2022). Intelligent Decision Support Systems. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-87790-3>
19. Ruban, I. V., Tjutjunyk, V. V. & Tjutjunyk, O. O. (2021). Osoblyvosti stvorennja systemy pidtrymky pryjnattja antykrizovyh rishen' v umovah nevyznachenosti vhidnoi' informacii' pry nadzvychajnyh sytuacijah. *Suchasni informacijni tehnologii' u sferi bezpeky ta oborony*, 1(40), 75-84. <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2021-40-1-75-84> [in Ukrainian].
20. Pavlenko, M. A., Osijevs'kyj, S. V., & Zolotuhina, O. A. (2014). Model' pidtrymky procesiv rozrobky rishen' na osnovi statystychno-jmovirnisnyh metodiv. Kyi'v: Logos [in Ukrainian].
21. Proskura, V. F. (2016). Integrovanyj pidhid do stvorennja regional'noi' informacijnoi' systemy resursnogo zabezpechennja. *Naukovyj visnyk Mukachivs'kogo derzhavnogo universytetu, Serija Ekonomika*, 2(6), 143-147 [in Ukrainian].
22. Kunanec', N. E., Fedorka, P. P. & Kut, V. I. (2023). Formuvannja rekomendacijnoi' systemy dlja «Rozumnogo regionu» z metodu obrannja informacijnyh tehnologij ta i'h realizacij pry stvorenni zastosunkiv. *Visnyk Nacional'nogo tehnicznego universytetu «HPI»*. *Serija: Systemnyj analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii*, 1 (9), 33-40. <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2023.01.05> [in Ukrainian].
23. Tehniczni vymogy ta metody zabezpechennja interoperabel'nosti i sumisnosti naboriv geoprostorovyh danyh ta geoinformacijnyh servisiv. Nakaz Ministerstva agrarnoi' polityky ta prodovol'stva Ukrai'ny № 347 (2021). (Ukrai'na). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0024-22#Text> [in Ukrainian].
24. Dorozhna karta rozvytku nacional'noi' interoperabel'nosti. Prozorist' ta pidzvitnist' u derzhavnomu upravlinni ta poslugah. Retrieved from https://tapas.org.ua/wp-content/uploads/2019/03/Interoperability_Road_Map.pdf [in Ukrainian].
25. Nesterenko, O. V., & Netesin, I. Je. (2012). Pro interoperabel'nist' komponentiv avtomatyzovanyh informacijno-analitychny system. *Pravova informatyka*, (34), 3-12 [in Ukrainian].

26. Zacerkovnyj, V., Savkov, P., Pampuha, I. & Synjavs'ka, I. (2020). Ocinka perevag merezhcentryzmu ta merezhcentrychnyh tehnologij dlja rozbudovy Zbrojnyh Syl Ukrai'ny. *Tekhnichni nauky ta tehnologii*, 3 (21), 163-184. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3\(21\)-163-184](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2020-3(21)-163-184) [in Ukrainian].
27. Dekker A. A Taxonomy of Network Centric Warfare Architectures. (2008). Defence Science & Technology Organisation. <https://csl.armywarcollege.edu/SLET/mccd/CyberSpacePubs/NCW%20Taxonomy.pdf>
28. Golovin, O. O. (2018). Jedynyj informacijnyj prostir – osnova efektyvnoi realizacii pryncypiv programno-cil'ovogo planuvannja rozvytku ozbrojennja ta vijs'kovoi tehniky. *Nauka i tehnika povitrjanyh syl zbrojnyh syl Ukrai'ny*, 2 (31), 41-46 [in Ukrainian].
29. Potapov, G. M., Filistjejev, D. A., Pryhodnjuk, V. V., Gordjejev, A. Ju. & Furman, O. A. (2020). Funkcional'ni harakterystyky merezhcentrychnoi ontografichnoi informacijnoi systemy specyfichnogo pryznachennja. *Telekomunikacijni ta informacijni tehnologii*, 3 (68), 41-54. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2020.034154> [in Ukrainian].
30. Holoborodko, M., & Kondratenko, Y. (2025). Merezhcentrychnyj pidhid do pobudovy informacijnoi infrastruktury: pryncypy ta perevagy. *Theoretical and practical aspects of the formation of scientific* (pp. 116-120). Ryga: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-536-5-28> [in Ukrainian].
31. Ljahovych, G. I., Zhekallo, G. I. & Vakun, O. V. (2023). Komunikacija organiv misceвого samovrjaduvannja iz gromadjanamy v umovah cyfrovizacii: dosvid Chehii. *Naukovi innovacii ta peredovi tehnologii*, 10 (24), 137-149. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-10\(24\)-137-149](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-10(24)-137-149) [in Ukrainian].
32. Boguslavs'ka, S. (2023). Uprovadzhennja informacijnyh system regional'nogo menedzhmentu dlja zabezpechennja povojennogo vidnovlennja ekonomiky Ukrai'ny. *Ekonomichnyj analiz*, 33(3), 79-87. <https://doi.org/10.35774/econa2023.03.079> [in Ukrainian].
33. Department of Economic and Social Affairs. (2024). E-Government survey 2024. Accelerating digital transformation for sustainable development. New York: United Nations.
34. Koshel', A. O., Koshel', D. O., Kempa, O. Geoinformacijne zabezpechennja strategichnogo planuvannja ta monitoryngu regional'nogo rozvytku ukrai'ny v umovah vojenного станu. <https://journals.indexcopernicus.com/api/file/viewByFileId/2098124> [in Ukrainian].
35. Dumitrescu, Peculea A., & Chitescu, R. I. (2015). The role of decision support systems (DSS) in the optimization of public sector management. *Corporate governance*, 137-141. <https://doi.org/10.15308/finiz-2015-137-141>
36. Peignot, J., Peneranda, A., Amabile, S. & Marcel, G. (2013). The Use of Information Systems on the Decision-making and Performance Management of Local Government. *International Business Research*; 6 (2). <https://doi.org/10.5539/ibr.v6n2p92>. s 92-100
37. Patterson, E., & Agarwal, R. (2023). Reducing the gap between rhetoric and reality: Use of Digital Service Standards for public service innovation through digital transformation in Australia. *Australian Journal of Public Administration*, 82, 557–589. <https://doi.org/10.1111/1467-8500.12615>
38. Innovations in public governance. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/projects-and-activities/innovations-public-governance_en An official website of the European Union. <https://doi.org/10.18356/4bbb6eba-en>
39. Haug, N., Dan, S. & Mergel, I. (2024). Digitally-induced change in the public sector: a systematic review and research agenda. *Public Management Review*, 26 (7), 1963-1987. <https://doi.org/10.1080/14719037.2023.2234917>
40. Gomes Rêgo De Almeida P., Mota Fernandes L., de Oliveira Ribas M., Gomes Pessoa D., Aquino M. G. & Denner C. (2022). Trajectories and challenges for data governance implementation in the public sector: a systematic review. *Encontro da ANPAD*, 1-28.
41. Xanthopoulou, P., Antoniadis, I., Avlogiaris, G. (2023). Unveiling the drivers of digital governance adoption in public administration. *Problems and perspectives in management*, 21(4), 454-467. [http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21\(4\).2023.35](http://dx.doi.org/10.21511/ppm.21(4).2023.35)

42. Pankratova, N. D. (2005). Systemnyi analiz. Teoriya ta zastosuvannya. Kyi'v: Naukova dumka [in Ukrainian].
43. Vymogy do zahystu informacii' v informacijnyh systemah u vojennyj chas: Derzhavna sluzhba special'nogo zv'jazku ta zahystu informacii' Ukrainy. (2022, lypen' 19). Retrieved from <https://cip.gov.ua/ua/news/vimogi-do-zakhystu-informaciyi-v-informacinih-sistemakh-u-voyennii-chas-roz-yasnennya-derzhspeczv-yazku> [in Ukrainian].
44. Regiony. <https://thedigital.gov.ua/regions/news>. Ministerstvo cyfrovoi' transformacii' Ukrainy. Oficijnyj veb-sajt [in Ukrainian].
45. Publikacii'. <https://www.ukrstat.gov.ua> Derzhavnoi' sluzhby statystyky Ukrainy. Oficijnyj veb-sajt [in Ukrainian].
46. Ukrai'na. <https://eufordigital.eu/ru/countries/ukraine/>. EU4DIGITAL [in Ukrainian].
47. Derzhavnyj veb-portal bjudzhetu dlja gromadjan. <https://openbudget.gov.ua>. Open budget [in Ukrainian].
48. Nabory danyh. <https://data.gov.ua/dataset>. <https://data.gov.ua> [in Ukrainian].
49. Obladnannya ta programne zabezpechennja. <https://www.oracle.com/ua/applications/>. Oficijnyj sayt kompanii' Oracle.
50. Data and AI Solutions. https://www.sas.com/ru_ua/home.html. Oficijnyj sayt kompanii' SAS Institute.

The article was received 28.02.2025 and was accepted after revision 10.05.2025

Просянкін-Жарова Тетяна Іванівна

к.е.н., доцент, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.pruman@gmail.com

УДК 69.059.2:624.159.2

Yaroslav Berchun, PhD, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-2870> **e-mail:** berchun93@gmail.com

Roman Telychko, Leading Engineer

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-7919> **e-mail:** roman.telychko@gmail.com

Oleg Klymenkov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> **e-mail:** oleg@klymenkov.com

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

ASSESSMENT OF CHANGES IN THE TECHNICAL CONDITION OF DAMAGED MULTI-STORY BUILDINGS BY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Abstract. *The article presents the results of the analysis and prospects for applying information technologies to select effective organizational, technological, and technical solutions for eliminating the emergency destruction of multi-story buildings damaged as a result of Russian aggression. Information and mathematical modeling is considered a key tool for assessment and decision-making, especially under conditions of limited access to the research object and a lack of information about its technical condition. The subject of this research is a previously unstudied issue: the development of a method for the urgent stability assessment of damaged multi-story buildings (DMBs) amid large-scale surveys, which will reduce the time for inspection, modeling, and decision-making regarding the reinforcement and reconstruction of a DMB or its dismantling. An important aspect of this method is forecasting the technical condition of DMBs using modern digital elements of artificial intelligence–neural networks. Optimizing the decision-making process under uncertainty is possible with the prior development of standard organizational and technological anti-emergency measures and methods for their application to typical DMB objects. Linking existing, pre-developed solutions using information and mathematical models of typical objects to a specific emergency DMB based on the pattern recognition principle allows for accelerating the selection of an option and ensuring the conduct of emergency rescue operations. In turn, this will help rescue potential victims, prevent accidents, and become part of the emergency response plan. In the post-war period, the use of the presented methodology will allow for the rapid assessment and forecasting of the technical condition of DMBs and the selection of an optimal strategy for their stabilization and reconstruction, including the frequency of monitoring needs and repair timelines. The application of neural networks, particularly hybrid models (CNNs, LSTMs, autoencoders), opens fundamentally new opportunities for shifting from a reactive to a proactive approach in assessing the technical condition of protective engineering structures (PES). The implementation of such technologies will enable automation of damage analysis, forecasting of damage progression, and the generation of well-grounded recommendations for repair, reinforcement, or demolition of structures. This significantly enhances the efficiency of decision-making and reduces risks for rescuers and engineers.*

Keywords: *damaged multi-story buildings; technical condition; mathematical modeling; neural networks; risk of progressive collapse.*

Я.О. Берчун, Р.І. Теличко, О.А. Клименков

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

ОЦІНКА ЗМІНИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПОНІВЕЧЕНИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Анотація. У статті наведено результати аналізу та перспективи застосування інформаційних технологій для вибору ефективних організаційних, технологічних і технічних рішень у ліквідації аварійного руйнування понівечених багатоповерхових будівель внаслідок російської агресії. Інформаційно-математичне моделювання розглядається як ключовий засіб оцінки та прийняття рішень, тоді як зазвичай існує обмежений доступ до об'єкта дослідження та брак інформації про його технічний стан. Предметом дослідження є питання, яке раніше не досліджувалося: розробка методу термінової оцінки стійкості понівечених багатоповерхових будівель (ПББ) в умовах значного масштабу обстежень, що дозволить скоротити час обстеження, моделювання та прийняття рішень щодо посилення та реконструкції ПББ або його демонтажу. Одним з важливих аспектів цього методу є прогноз технічного стану ПББ за допомогою сучасних цифрових елементів штучного інтелекту – нейронних мереж. Оптимізація процесу прийняття рішень в умовах невизначеності можлива за умови попередньої розробки типових організаційно-технологічних протиаварійних заходів та методики їх застосування на типових об'єктах ПББ. Прив'язка існуючих, попередньо розроблених рішень з використанням інформаційно-математичних моделей типових об'єктів до конкретного аварійного ПББ на основі принципу розпізнавання образів дозволяє прискорити вибір варіанту та забезпечити проведення аварійно-рятувальних робіт. У свою чергу, це сприятиме порятунку можливих постраждалих, запобігатиме нещасним випадкам та стане частиною плану реагування на надзвичайні ситуації. У післявоєнний час використання представленої методики дозволить оперативно оцінити та прогнозувати технічний стан ПББ і вибрати оптимальну стратегію її стабілізації і реконструкції, включаючи періодичність моніторингу, потреби і терміни ремонту.

Ключові слова: понівечені багатоповерхові будівлі; технічний стан; математичне моделювання; нейронні мережі; ризик прогресуючого колапсу.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.185-198>

Вступ

Зростаюче світове населення та житловий фонд постійно зазнають впливу природних катаклізмів, землетрусів або військових дій. Вкрай важливо створити нові інформаційні методології, які допоможуть вирішити ці проблеми сьогодення. Незважаючи на те, що це питання актуальне в усьому світі, такі методології та рішення повинні бути прийняті в першу чергу на місцевому рівні через специфічні будівельні матеріали, технології чи типи пошкоджень. Стаття присвячена пошкодженню житлових будинків через триваючу війну та військові дії в Україні. З 24.02.2022 росія зруйнувала чи пошкодила в Україні понад 210 000 будівель. У тому числі: 106 лікарень, 109 церков, 708 шкіл. Серед найбільш постраждалих міст називають Ірпінь, Харків, Маріуполь, Рубіжне,

Мар'їнка. Про це свідчить аналіз, проведений The New York Times разом із двома провідними вченими в галузі дистанційного зондування Корі Шером із Центру аспірантури Міського університету Нью-Йорка та Джеймоном Ван Ден Хуком із Університету штату Орегон (рис. 1) [1].

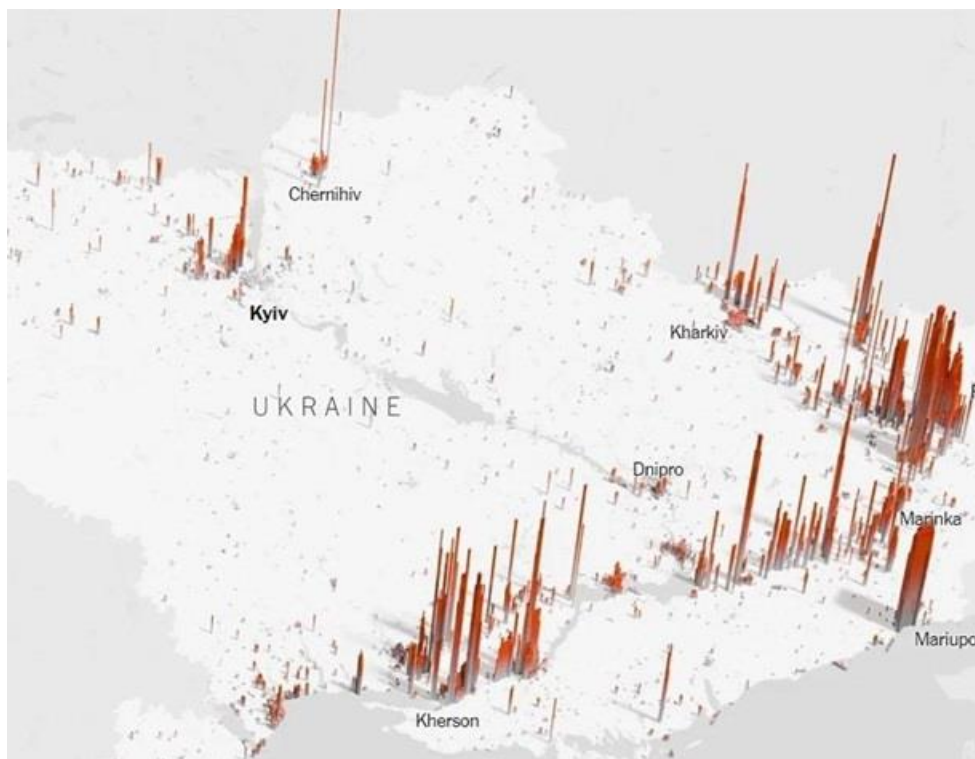


Рис. 1. Стовпчикова діаграма на мапі України зруйнованих будівель та споруд на 4 червня 2024 [1]

Для аналізу використовувалися дані радіолокаційних супутників, які можуть виявляти навіть невеликі зміни в будівлях. Близько 900 пошкоджених чи зруйнованих будівель – це об'єкти, захищені Женевськими конвенціями (встановлюють стандарти гуманного поводження під час війни). Українська оцінка вища: прем'єр-міністр України Денис Шмигаль у травні 2024 року наголосив, що росія зруйнувала чи пошкодила в Україні 250 тисяч житлових будівель, близько 4 тисяч шкіл, понад тисячу лікарень та багато інших цивільних об'єктів. Збитки країні через вторгнення він оцінив у 486 млрд доларів [2]. Відбудова та реконструкція українського житла, безсумнівно, включатиме багато факторів, і нові підходи будуть необхідні та прийняті (рис. 2 [3]). Вирішення вищезазначених питань потребує всебічного дослідження, оскільки кількість пошкоджених будівель на момент подання цієї роботи щоденно зростає в умовах продовження бойових дій. Ситуація мінлива, а актуальних статистичних даних про реальні масштаби руйнувань у багатьох містах України немає.

Предметом дослідження є питання, яке раніше не досліджувалося: розробка методу термінової оцінки стійкості понівечених багатоповерхових будівель (ПББ) в умовах значного масштабу обстежень, що дозволить скоротити час

обстеження, моделювання та прийняття рішень щодо посилення та реконструкції ПББ або його демонтажу. Одним з важливих аспектів цього методу є прогноз технічного стану ПББ за допомогою сучасних цифрових елементів штучного інтелекту – нейронних мереж.

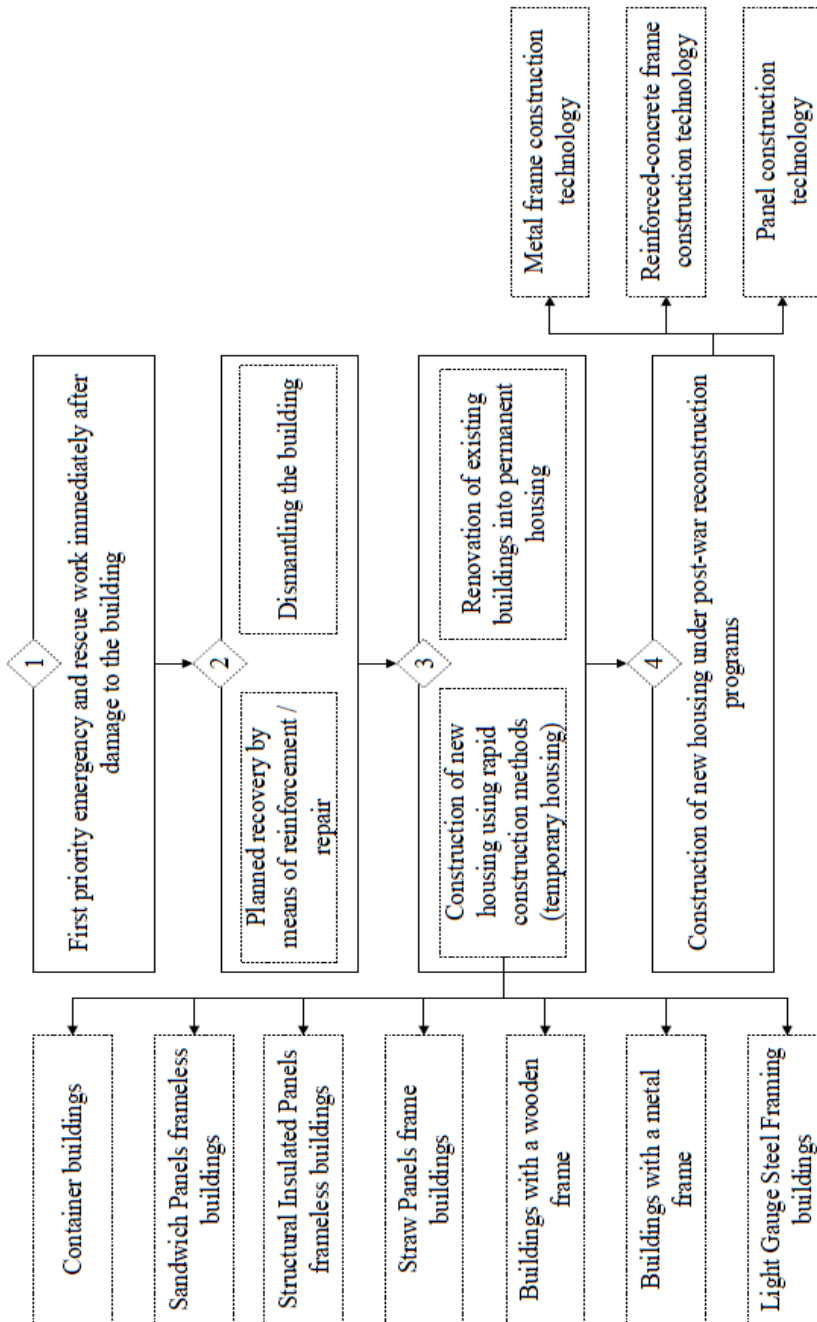


Рис. 2. Основні проблеми, які постали перед будівельним фондом України внаслідок військових дій [3]

Методи досліджень

Оптимізація процесу прийняття рішень в умовах невизначеності можлива за умови попередньої розробки типових організаційно-технологічних протиаварійних заходів та методики їх застосування на типових об'єктах ПББ. Прив'язка існуючих, попередньо розроблених рішень з використанням інформаційно-математичних моделей типових об'єктів до конкретного аварійного ПББ на основі принципу розпізнавання образів дозволяє прискорити вибір варіанту та забезпечити проведення аварійно-рятувальних робіт. У свою чергу, це сприятиме порятунку можливих постраждалих, запобігатиме нещасним випадкам та стане частиною плану реагування на надзвичайні ситуації.

На початковому етапі обстеження ПББ важко отримати об'єктивну інформацію про її фактичний технічний стан через небезпечний та обмежений доступ до об'єкта обстеження та наявність ризику непередбаченого обвалення зруйнованих конструкцій. Відповідно, використання імітаційного та інформаційно-математичного моделювання [4] може бути ефективним методом оперативно-імовірнісного підтвердження висновку про технічний стан пошкодженої будівлі в умовах інформаційної невизначеності, коли прийняття рішення щодо запобігання розвитку динаміки руйнування є актуальним. Це дозволяє приймати рішення на основі найсучасніших розрахункових моделей і технічних характеристик, а також може включати експертну оцінку тощо для отримання прогностичних даних щодо стійкості конструкцій.

Під час первинного огляду ПББ, безпосередньо після пошкодження, слід враховувати, що на момент пошкодження будівлі основними факторами, що впливають на конструкцію та призводять до руйнування, є [5]:

- надлишковий тиск у зоні впливу;
- термічні ефекти, які можуть виникнути в результаті розриву снаряда або пожежі;
- пошкодження уламками, які можуть бути первинними, вторинними або обома;
- снаряди під напругою побутові газові прилади, які можуть викликати подальший вибух (наприклад, після влучання ракети в житловий будинок на вулиці Чорнобильській у Києві, там виникла вторинна пожежа, і 64 квартири із 126 були сильно пошкоджені [6]);
- кратероутворення та удари ґрунту, які можуть спровокувати подальше зміщення та обвалення конструкцій.

Тому важливо об'єктивно та якнайшвидше після нанесення пошкоджень оцінити вищеперелічені фактори, щоб запобігти подальшому руйнуванню будівлі та уникнути небезпеки для спеціалістів, які працюють на об'єкті.

Нейронні мережі – це один з основних інструментів штучного інтелекту, який ефективно використовується для прогнозування у різних сферах діяльності. Вони моделюють роботу людського мозку, дозволяючи обробляти великі обсяги даних та виявляти складні залежності між вхідними та вихідними параметрами. Прогнозування числових рядів – це важливе завдання в аналітиці даних, яке має широке практичне значення. Йдеться про передбачення майбутніх значень на основі попередніх даних. У цьому

контексті нейронні мережі зарекомендували себе як потужний інструмент, здатний моделювати складні та нелінійні залежності у часі. Нами вони будуть використані для прогнозування зміни технічного стану ПББ у часі.

Результати вимірів і прогнозів на місці. Огляд будівлі на предмет пошкоджень

У разі обмеженого доступу до пошкодженої будівлі існуючі види обстежень доцільно доповнити ще одним видом – попередньою дистанційною оцінкою технічного стану споруд. Попередню дистанційну оцінку технічного стану будівлі необхідно проводити у разі загрози непередбачуваного обвалення конструкцій і, як наслідок, обмеження доступу до об'єкта огляду.

На наступних етапах обстеження аварійної будівлі, які включають візуальне та детальне інструментальне обстеження, інформаційна модель потребує уточнення [7, 8]. Лише за умови беззаперечної впевненості щодо критичності пошкоджень та прогнозованого прогресуючого обвалення будівлю можна вважати такою, що не підлягає ремонту. Якщо це не підтверджується прогнозами, або якщо все ще бракує інформації для прийняття обґрунтованого рішення, необхідно провести додаткове візуальне та детальне інструментальне обстеження.

На основі детального огляду слід зазначити місця дефектів, уточнити інформаційно-математичну модель розрахунку та повторити моделювання. Після визначення заходів з укріплення та ремонту необхідно скласти кошторис та оцінити вартість реставраційних робіт.

У разі більш складних руйнувань отримують вихідні дані для проектування відновлення будівлі шляхом капітального ремонту або реконструкції. Для цього необхідне інструментальне обстеження з встановленням фізико-технічних характеристик елементів конструкції будівлі та її стиків. Інструментальна зйомка (геодезичні спостереження за деформаціями будівлі, оцінка стану конструкцій і з'єднань неруйнівними методами та ін.) повинні проводитися в обсягах, достатніх для проектування заходів щодо відновлення експлуатаційної придатності з урахуванням результатів попередніх етапів обстеження та попередніх розрахунків.

Розрахунок несучої здатності будівлі в цілому та розробку рішень щодо підсилення та ремонту необхідно проводити з використанням інформаційно-математичної моделі [9–11], уточненої за результатами інструментальних обстежень і габаритних креслень, з урахуванням встановлених фізико-технічних характеристик будівельних конструкцій за результатами детального обстеження, що передбачає отримання всієї необхідної інформації для розробки проекту реставрації будівлі (рис. 3 [3]).

Попередня обробка даних включає попередню обробку даних дистанційного дослідження та існуючих будівельних матеріалів для визначення типу ПББ та конструктивної схеми. При обстеженні пошкоджень визначається їх локалізація, ступінь пошкодження, пошкоджені елементи конструкції ПББ. Тому на даному етапі може виникнути висока потреба в автоматизації процесу визначення збитку на основі цифрових технологій.

Корекція розрахункової моделі включає створення інформаційно-математичної моделі та виділення пошкоджених елементів конструкції для оцінки стійкості будівлі. Для цього для побудови інформаційно-математичної

моделі можуть бути використані такі методи: метод скінченних елементів (МСЕ), метод дискретних елементів (МДЕ), метод прикладних елементів (МПЕ) або метод згуртованих елементів (МЗЕ). Застосування методу скінченних елементів (МСЕ) є найбільш доцільним через його широке застосування в оцінці можливості прогресуючого руйнування будівлі [14–15].

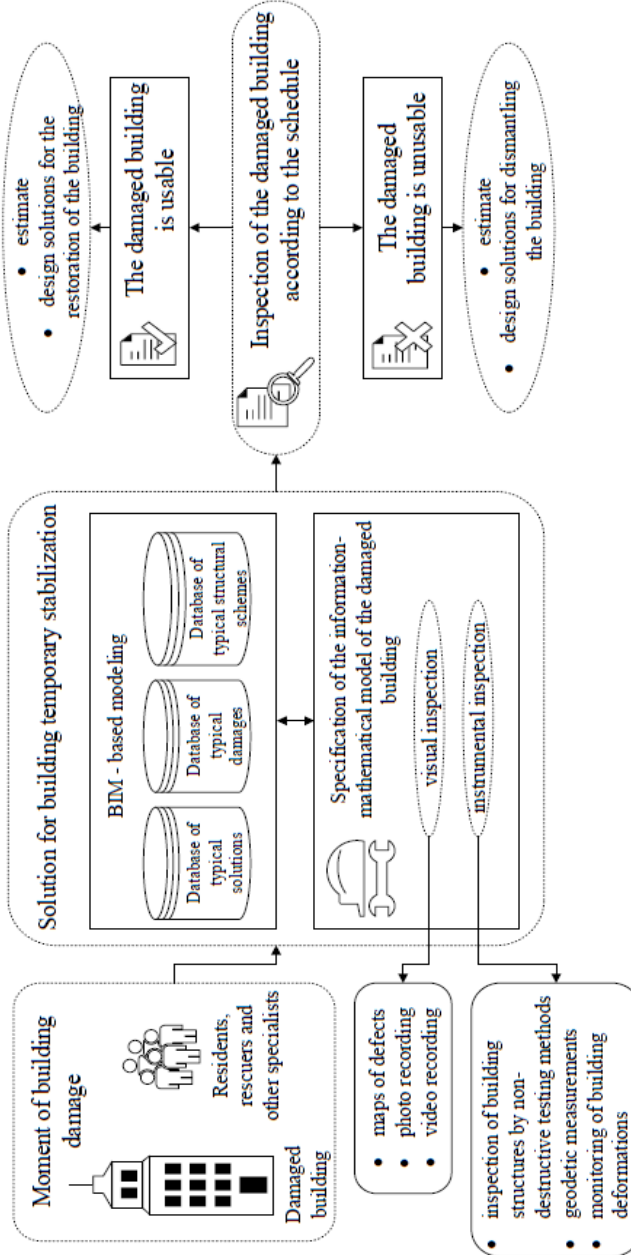


Рис. 3. Запропонована концептуальна схема оцінки технічного стану пошкодженого великопанельного будинку з використанням бази даних типових рішень та попередньої дистанційної оцінки на етапі проведення аварійно-рятувальних робіт [3]

Оцінка ризику включає розрахунок деформацій і можливості розвитку неконтрольованого прогресуючого обвалення будівлі. Прогресуючий колапс – це колапс, який починається з локалізованого пошкодження одного або кількох структурних компонентів і розвивається по всій структурній системі, впливаючи на інші компоненти [15–17]. У загальному випадку оцінка прогресуючого руйнування будівлі виконується за рівнянням:

$$R(S) = R(S|DQ) \times R(P|Q) \times R(Q),$$

де: $R(S)$ – ймовірність прогресуючого колапсу; $R(S|P)$ – ймовірність прогресуючого руйнування конструкції внаслідок локального пошкодження P ; $R(P|Q)$ – ймовірність локального пошкодження P внаслідок небезпеки Q ; $R(Q)$ – ймовірність виникнення небезпеки Q [17–19].

Відповідно, ймовірність прогресуючого колапсу можна мінімізувати трьома способами: контролем аномальних подій, контролем поведінки локальних елементів та/або контролем поведінки глобальної системи [20]. Оцінюючи ризики, необхідно враховувати, що прогресуюче руйнування будівлі може розвиватися за одним із видів або їх комбінацією. Starossek, U., & Haberland, M. [21] визначили шість типів прогресуючого колапсу: млинцевий, блискавковий, доміно, секційний, нестабільний та змішаний тип (*pancake-, zipper-, domino-, section-, instability-, and mixed-type collapses*) [21]. При оцінці ризиків неконтрольованого прогресуючого руйнування будівлі важливий детальний аналіз значень деформацій, отриманих у результаті модельного розрахунку. Однак не всі фактори, що впливають на розвиток деформацій, можна повністю оцінити через брак часу та обмежений доступ до будівлі. Наприклад, на загальну стійкість будівлі та її конструкцій впливає якість з'єднань панелей та їх стан на момент пошкодження будівлі, який також залежить від тривалості її експлуатації [22–25]. Визначення поточного технічного стану швів може проводитися на етапі детального обстеження будівлі методами неруйнівного контролю. Особливо важливо визначити стан стиків у місцях, близьких до епіцентру ураження, щоб запобігти неконтрольованому руйнуванню конструкцій. Водночас у деяких випадках виконання цих робіт може бути небезпечним і можливе лише після стабілізації та тимчасового зміцнення будівлі. Враховуючи все вищевикладене, випадки, для яких розрахункові значення деформацій близькі або перевищують нормативні, слід розглянути більш детально і уважно.

Прогнозування за допомогою нейронних мереж

Прогнозування динаміки зміни технічного стану понівечених багатопверхових будівель є ключовим завданням для запобігання подальшим руйнуванням та прийняття обґрунтованих рішень щодо їхньої долі: укріплення, реконструкції чи демонтажу. В умовах, коли пошкодження є масовими, а доступ до об'єктів ускладнений, традиційні методи інструментального обстеження стають неефективними через значні затрати часу та високі ризики для персоналу. Саме тому застосування технологій штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, відкриває нові перспективи для створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень.

Нейронні мережі є потужним інструментом для аналізу складних, нелінійних залежностей у великих масивах даних. Для завдань оцінки стану будівель такими даними можуть виступати:

- Візуальні дані: цифрові фотографії та відео, отримані з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), дані лазерного сканування (LIDAR), що фіксують геометрію пошкоджень, наявність та характер тріщин, відколів бетону, оголення арматури.

- Часові ряди: дані з датчиків, встановлених на конструкціях (акселерометрів, тензометрів, датчиків нахилу), що фіксують динаміку деформацій, коливань та інших параметрів у часі.

- Проектні та експлуатаційні дані: інформація про конструктивну схему будівлі, матеріали, рік зведення, історію попередніх ремонтів.

На основі аналізу цих даних належно навчена нейромережева модель здатна не лише класифікувати поточний стан пошкоджень, але й прогнозувати їх розвиток, що є критично важливим для оцінки ризику прогресуючого обвалення.

Архітектури нейронних мереж та їх застосування

Залежно від типу вхідних даних та специфіки завдання, для оцінки стану ПББ можуть бути використані різні архітектури НМ.

Згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN) є стандартом для аналізу візуальних даних. У нашому контексті CNN можуть бути навчені для автоматичної ідентифікації, класифікації та сегментації пошкоджень на зображеннях. Наприклад, мережа може визначати зони з тріщинами, обчислювати їх ширину та довжину, виявляти місця руйнування несучих елементів. Такий підхід значно прискорює процес первинного огляду та дозволяє створювати детальні "карти пошкоджень" для кожної будівлі. Ефективність CNN для класифікації пошкоджень будівель за супутниковими знімками була продемонстрована у роботі Wang та ін. [26].

Рекурентні нейронні мережі (Recurrent Neural Networks, RNN), зокрема їх просунутий варіант – мережі з довгою короткочасною пам'яттю (Long Short-Term Memory, LSTM), є ідеальним інструментом для аналізу часових рядів. Якщо на будівлі встановлено систему моніторингу, LSTM-мережа може аналізувати послідовності даних (наприклад, щоденні показники нахилу стіни або розкриття тріщини) і прогнозувати їхні значення на майбутнє. Це дозволяє завчасно виявити тенденцію до прискорення деградаційних процесів та попередити про наближення до критичного стану.

Автокодері (Autoencoders) – це тип НМ, що ефективно вирішує завдання детекції аномалій. Модель навчається на даних, що описують "здоровий", непошкоджений стан конструкції. Надалі, при аналізі даних з пошкодженої будівлі, автокодер виявлятиме значні відхилення (аномалії), які сигналізують про наявність та серйозність дефектів, що не завжди помітні при візуальному огляді. Застосування автокодерів для виявлення пошкоджень у конструкціях детально розглянуто у праці Salehi та ін. [27].

Гібридні моделі. Найбільш перспективним є поєднання різних архітектур. Наприклад, гібридна модель CNN-LSTM може одночасно аналізувати зображення пошкоджень (через CNN) та динаміку їх зміни в часі (через LSTM).

Такий комплексний підхід дозволяє отримати значно точніші та надійніші прогнози. Успішний досвід застосування подібних гібридних фреймворків для моніторингу стану мостів та висотних будівель описаний у дослідженні Lin та ін. [28].

Приклад застосування автокодера на основі LSTM для аналізу технічного стану будівель

У рамках проведеного дослідження було обрано демонстраційний приклад із використанням відкритого датасету Albina Yard Building, який містить записи амб'єнтних вібрацій реальної чотириповерхової будівлі у Портленді (США). Цей датасет включає високочастотні дані з 18 акселерометрів, встановлених на різних рівнях конструкції, та відображає динамічну поведінку будівлі в умовах природного навантаження.

Для ілюстрації можливостей нейронних мереж у задачах автоматизованого виявлення пошкоджень було реалізовано архітектуру автокодера на основі довгої короткочасної пам'яті (Long Short-Term Memory, LSTM). Автокодер навчався відтворювати «здоровий» сигнал без пошкоджень і аномалій. Після навчання на непошкоджених даних модель демонструє низьку похибку реконструкції, тоді як на ділянках сигналу з аномаліями помилка різко зростає. Це дозволяє виявляти нетипові події та потенційні дефекти без необхідності їхнього явного маркування.

Навчання LSTM-автокодера здійснювалося на часових вікнах довжиною 2048 відліків (1 секунда при частоті дискретизації 2048 Гц). Для наочності до тестового набору даних було внесено штучні аномалії шляхом масштабування амплітуди сигналу одного з каналів. Уже після двох епох навчання середньоквадратична похибка реконструкції (RMSE) знизилася з початкових значень понад 4 до рівня близько 0.5, а функція втрат (Loss) наблизилася до нуля. Це свідчить про здатність моделі ефективно відтворювати типові вібраційні патерни.

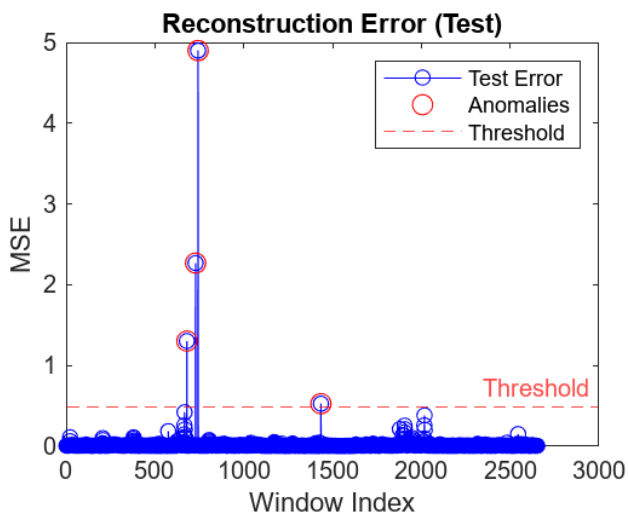


Рис. 4. Графік помилки реконструкції на тестових даних з внесеними штучними аномаліями: піки MSE вище встановленого порогу вказують на коректне виявлення аномалій

На рис. 4 наведено графік помилки реконструкції для тестових даних. Видно, що більшість вікон мають низький рівень середньоквадратичної помилки (MSE), тоді як на ділянках зі штучно доданими аномаліями помилка різко перевищує встановлений поріг. Таким чином, модель правильно ідентифікує відхилення, які не були присутні в навчальних даних. Це підкреслює потенціал підходу для виявлення нових або раніше невідомих дефектів, характерних для аварійно пошкоджених конструкцій.

Детальніше процес реконструкції показано на рис. 5, де порівнюються вхідний сигнал і його відновлення для одного з вікон даних. Для нормальних ділянок синя лінія (оригінальний сигнал) та червона пунктирна (реконструйований сигнал) практично збігаються, що підтверджує адекватність навченої моделі. У випадку пошкоджень або аномалій очікується помітне розходження цих кривих.

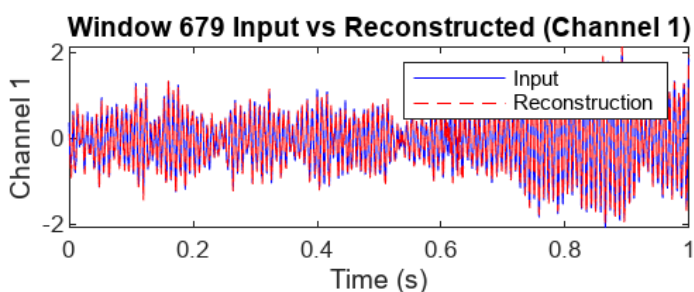


Рис. 5. Порівняння вхідного та реконструйованого сигналу (канал 1) для одного вікна даних: висока точність відтворення без аномалій.

Отримані результати демонструють, що навіть проста реалізація LSTM-автокодера в середовищі MATLAB може слугувати ефективним інструментом для автоматизованого моніторингу стану будівель. Подібні моделі можуть бути інтегровані у системи структурного здоров'я (Structural Health Monitoring, SHM) для безперервного контролю вібраційних характеристик будівлі та своєчасного виявлення критичних змін. Такий підхід здатен істотно зменшити час обстеження, знизити ризики для персоналу та підвищити надійність прогнозів технічного стану.

Таким чином, наведений приклад на основі датасету Albina Yard ілюструє практичні переваги застосування рекурентних нейронних мереж і автокодерів для задач оцінки та прогнозування технічного стану пошкоджених багатоповерхових будівель. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на створення розширених моделей, здатних поєднувати дані з датчиків, геометричні параметри конструкцій та візуальні спостереження, формуючи комплексну систему оцінки та попередження аварійних ситуацій.

Висновки

1. Дистанційні спостереження за ПББ можуть проводитися за допомогою лазерних сканерів, БПЛА (дронів), роботизованих тахеометрів тощо. Попередня оцінка пошкодженої будівлі проводиться на основі наявних вихідних даних, отриманих дистанційно: матеріалів фото- та відеозйомки, наявної технічної документації, планів поверхів, фасадів, креслень у розрізах.

2. За результатами візуальних обстежень ПББ можна розробити попередні рекомендації щодо небезпеки прогресуючого руйнування з урахуванням отриманих пошкоджень. На жаль, наразі такі рішення приймаються інтуїтивно, на основі досвіду фахівців, які виконують аварійно-рятувальні роботи. Їхні дії є усвідомленим ризиком, який може призвести до непередбачуваних наслідків.

3. Застосування нейронних мереж, зокрема гібридних моделей (CNN, LSTM, автокодерів), відкриває принципово нові можливості для переходу від реактивного до проактивного підходу в оцінці технічного стану ПББ. Впровадження таких технологій дозволить автоматизувати процес аналізу пошкоджень, прогнозувати динаміку їх розвитку та надавати обґрунтовані рекомендації щодо ремонту, укріплення чи демонтажу споруд. Це значно підвищує оперативність прийняття рішень та знижує ризики для рятувальників та інженерів. Подальший розвиток цього напрямку вимагає вирішення таких завдань, як формалізація процедур збору даних, створення національної бази даних структурних пошкоджень для навчання НМ та розробка інтегрованих програмних комплексів для їх практичного застосування у сфері цивільної безпеки та відбудови України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Popina, K., Reinhard, S., & Van Den Hoek, J. (2024, June 4). Scientists have calculated how many buildings in Ukraine were destroyed by the Russian army: The quantity is shocking. Dialog.ua. https://www.dialog.ua/ukraine/296077_1717492762
2. Komersant.info. (2024, May 2). Росія з початку великої війни зруйнувала та пошкодила понад 250 тисяч українських будинків (in Ukrainian). [Russia has destroyed and damaged over 250,000 Ukrainian homes since the beginning of the great war]. <https://www.komersant.info/rosiia-z-pochatku-velykoi-viyny-zruynuvala-ta-poshkodyla-ponad-250-tysiach-ukrainskykh-budynkiv/>
3. Hryhorovskiy, P., Osadcha, I., Jurelionis, A., Basanskyi, V., & Hryhorovskiy, A. (2022). A BIM-based method for structural stability assessment and emergency repairs of large-panel buildings damaged by military actions and explosions: Evidence from Ukraine. *Buildings*, 12(11), 1817. <https://doi.org/10.3390/buildings12111817>
4. TIMB. (2022, August 5). BIM Information Modeling Technologies in Construction. <https://www.timb.org.ua/>
5. Eskew, E., & Jang, S. (n.d.). Impacts and Analysis for Buildings under Terrorist Attacks. ResearchGate. Retrieved August 10, 2022, from https://www.researchgate.net/publication/311517061_Impacts_and_Analysis_for_Buildings_under_Terrorist_Attacks
6. Suprun, M. (2022). The rocket-damaged high-rise on Chornobyl'skaya is being restored according to modern standards. Velykyi Kyiv. <https://bigkyiv.com.ua/poshkodzhenu-raketoyu-bagatopoverhivku-na-chornobylskij-vidnovlyuyut-za-suchasnymy-standartamy/>
7. Ministry of Development of Communities and Territories of Ukraine. (2022). Methods of inspection of buildings and structures damaged as a result of emergencies, hostilities, and acts of terrorism. Verkhovna Rada of Ukraine. <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0065914-22#Text>
8. Grigorovskiy, P., Chervyakov, Y., Basanskyi, V., Kroshka, Y., Murasyova, O., & Chukanova, N. (2019). Information modeling of organizational and technological solutions of instrumental measurements in the creation and maintenance of construction objects. *Construction Production Science Technology*, 67, 7–16.
9. Mikhailenko, V., Rusan, I., Hryhorovskiy, P., Terentiev, O., Sviderskyi, A., & Horbatyuk, E. (2018). Models and methods of the information system for diagnosing the technical condition of construction objects. Comprint.

10. Trofymchuk O., & Kaliukh I. (2013). Activation of landslides in the south of Ukraine under the action of natural seismic impacts (experimental and analytical studies). *Journal of Environmental Science and Engineering*, 2(2), 68-76.
11. Kaliukh, I., Voloshkina, O., Efimenko, V., Sipakov, R., Zhukova, O., & Kaliukh, T. (2022, November). Modern technologies of Internet of Things in the restrained urban development for complicated ground conditions [Paper presentation]. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580086>
12. Demenov, A., & Artamonov, A. (2015). Information modeling in the operation of buildings and structures. *Science*, 7, 1–9.
13. Ivanyk, I., Vikhot, S., Pozhar, R., Ivanyk, Y., & Vybranets, Y. (2010). Basics of reconstruction of buildings and structures. Publishing House of the National University “Lviv Polytechnic”.
14. Havrylyak, A. (2009). Basics of technical operation of buildings and engineering systems. Publishing House of the National University “Lviv Polytechnic”.
15. Adam, J. M., Parisi, F., Sagasetta, J., & Lu, X. (2018). Research and practice on progressive collapse and robustness of building structures in the 21st century. *Engineering Structures*, 173, 122–149. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.055>
16. Izzuddin, B. A., Vlassis, A. G., Elghazouli, A. Y., & Nethercot, D. A. (2008). Progressive collapse of multi-storey buildings due to sudden column loss – Part I: Simplified assessment framework. *Engineering Structures*, 30(5), 1308–1318. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.07.011>
17. Kokot, S., & Solomos, G. (2012). Progressive collapse risk analysis: Literature survey, relevant construction standards and guidelines. Joint Research Centre, European Commission.
18. Ellingwood, B. R. (2006). Mitigating risk from abnormal loads and progressive collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 20(4), 315–323. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0887-3828\(2006\)20:4\(315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3828(2006)20:4(315)
19. Ellingwood, B. R., & Dusenberry, D. O. (2005). Building design for abnormal loads and progressive collapse. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 20(3), 194–205. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2005.00387.x>
20. Starossek, U., & Haberland, M. (2008, April 24-26). Measures of structural robustness–Requirements and applications [Paper presentation]. ASCE SEI 2008 Structures Congress–Crossing Borders, Vancouver, BC, Canada.
21. Starossek, U. (2007). Typology of progressive collapse. *Engineering Structures*, 29(9), 2302–2307. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.025>
22. Chistyakov, E., Zenin, S., Sharipov, R., & Kudinov, O. (2017). The accounting of a deformability of structural discrete connections in calculation of constructive systems of large-panel buildings. *Construction Science*, 2, 123–127.
23. Ye, Z., Giriunas, K., Sezen, H., Wu, G., & Feng, D.-C. (2020). State-of-the-art review and investigation of structural stability in multi-story modular buildings. *Journal of Building Engineering*, 33, 10184. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101841>
24. Inamdar, S. (2018). Joints and connections in precast concrete buildings. *International Journal of Scientific Research*, 7(6), 881–883. <https://www.ijsr.net/archive/v7i6/ART20183152.pdf>
25. Gunawardena, T., & Mendis, P. (2022). Prefabricated building systems–Design and construction. *Encyclopedia*, 2(1), 70–95. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010007>
26. Wang, W., Li, Z., Wu, Y., & Li, Y. (2020). Deep learning-based building damage detection from post-earthquake satellite imagery. *Remote Sensing*, 12(3), 350. <https://doi.org/10.3390/rs12030350>
27. Salehi, H., Bagheri, M., & Ghaffarian, S. (2019). Application of autoencoders in structural damage detection. *Engineering Structures*, 197, 109402. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109402>
28. Lin, T., Huang, Y., Sun, H., & Li, Y. (2021). Hybrid deep learning framework for

structural health monitoring: CNN and LSTM fusion approach. *Sensors*, 21(3), 947. <https://doi.org/10.3390/s21030947>

29. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>

Стаття надійшла до редакції 03.03.2025 і прийнята до друку після рецензування 26.05.2025

The article was received 03.03.2025 and was accepted after revision 26.05.2025

Берчун Ярослав Олександрович

PhD, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9373-2870> **e-mail:** berchun93@gmail.com

Теличко Роман Ігорович

провідний інженер Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-7919> **e-mail:** roman.telychko@gmail.com

Клименков Олег Анатолійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> **e-mail:** oleg@klymenkov.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, Суг, кегль 11, одинарний інтервал, полями 2,0 см з кожного боку, заданим розміром сторінок 17х26 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 17х26 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 20.06.25 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 17.5
Обл.-вид. арк. 13.56
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2025