

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 58

2026

**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 (58), квітень – травень 2026 р.

Заснований у 2008 р.
Виходить 4 рази на рік

Academic journal

Issue 2 (58), April – May 2026

Founded in 2008
The journal is published 4 times a year

КИЇВ 2026

KYIV 2026

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

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

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

О.С. ВОЛОШКІНА, д-р техн. наук, проф.

Н. КАСАГЛІ, професор, Італія

Н. МАРГВЕЛАШВІЛІ, PhD, Австралія

ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:

Ю.І. КАЛЮХ, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

В.О. 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, канд. техн. наук, проф.,

Фукусіма, Японія

Д. МІНТЕР, проф., Великобританія

А. МІШО, дослідник, Франція

М.Г. МУСТАФАЄВ, д-р с.-г. наук, професор,
Азербайджан

Я. ПЕКУТІН, проф., Польща

ПІНГ ЛІУ, проф., Китай

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (№ 5 від 28.04.2026)

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>

Свідцтво 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

Попов М.О., Пономаренко Р.В., Мосов С.П. Торф'яні пожежі як глобальна екологічна проблема.....	7
Воскобійник В.А., Лебідь О.Г., Воскобойник О.А., Меренгер Ю.П., Воскобойнік С.І. Вплив проникного пального хвилелому на поверхневі хвилі.....	18
Кожевніков С., Березницька Ю. Удосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів: напрями та очікувані ефекти.....	31
Козловська Т.Ф., Головенський В.В., Тягній В.Г., Кириченко О.П., Царенко А.О. Чинники нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден.....	43
Приходько В.Ю. Особливості застосування моделі landgem для визначення утворення метану від місць захоронення побутових відходів	60
Охарєв В.О., Підсадний С.Г. Технологія підвищення точності даних землекористування для задач геопросторового моделювання.....	72
Магась Н.І., Томченко О.В., Загородня С.А., Шевякіна Н.А. Індекс загрози біорізноманіттю: методика та апробація для об'єктів Смарагдової мережі в умовах катастрофічного затоплення.....	83
Герчук Д.В. Концептуальна модель геоінформаційної рекомендаційної системи формування сталих маршрутів до об'єктів спадщини.....	95

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Максименко А.В., Клімова І.В. Аналіз сучасних наукових досліджень щодо методів оцінювання впливу промислового шуму на працівників та його негативних наслідків для здоров'я.....	105
---	-----

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Trofymchuk O., Bidyuk P., Tymoshchuk O., Huskova V., Kroptya A. Financial risk analysis in multidimensional systems.....	117
Ustimenko V., Pustovit O. On extremal algebraic graphs, Eulerian transformations and implementations of multivariate cryptosystems.....	135

Терентьєв О.М., Просянкіна-Жарова Т.І., Аброскін Ю.Ю., Дуда В.О. Методика аналізу прокремлівської дезінформації в джерелах мережі інтернет.....	154
Тимчук В.Ю., Триснюк В.М., Худоба В.В., Делятинчук А.І. Геоінформаційна підтримка ситуаційної обізнаності в системах прийняття рішень для безпекових і кризових середовищ.....	161
Вишняков В.Ю., Ляшук О.І., Мамарев В.М., Андрущенко Ю.А., Кошлань О.В. Комплексний інформаційний та наземно-космічний моніторинг природних явищ та техногенних катастроф.....	172
Казачков І.В., Нестеренко О.В. Математичне моделювання та обчислювальний експеримент турбулентних двофазних струменів незмішуваних рідин та нанорідин...	189
Мостовий В.С., Коробенко А.П. Оцінка впливу маятника гасителя на сталевий консольний елемент просторової конструкції.....	206
Горлинський Б.В., Бондаренко Д.М., Лисенко Н.В., Масленникова Т.А., Курбет П.М. Дослідження проблематики використання електронного підпису для захисту інформації з обмеженим доступом.....	219
Семко О.В., Віннічук Д.О. Гібридний метод відстеження рухомих об'єктів у відеопотоці в умовах динамічного спостереження.....	230
Гнатюк С.Є., Грохольський Я.М., Сакович Л.М. Чорнобильська аварія і військовий радіозв'язок: аналіз організації та особливості функціонування	238
Худинцев М.М., Хоменко О.А., Клименков О.А. Методологічні основи оцінювання ризиків кіберстрахування.....	251
Шевченко Д.В., Голуб Б.Л., Триснюк Т.В. Відновлення пропущених екологічних даних у системі моніторингу якості атмосферного повітря на основі наївного байєсівського класифікатора.....	262
Белоус Р.В., Мосійчук Д.І. Метод оптимізації маршрутизації запитів у розподілених базах даних для зменшення затримок і навантаження.....	274
Крисенко П., Бектімиров А. Проблематика прогнозування показника IC50 для пар ліганд-білок за допомогою архітектури Transformer в умовах обмежених ресурсів.....	287
ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....	293

CONTENTS

ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

Popov M., Ponomarenko R., Mosov S. Peat fires as a global environmental problem.....	7
Voskoboinick V., Lebid O., Voskoboinyk O., Merenger Yu., Voskoboinik S. Influence of permeable pile breakwater on surface waves...	18
Kozhevnikov S., Berezhnyska Yu. Improvement of the regulatory and legal framework for the development of environmentally safe technologies for PVC profile recycling: directions and expected impacts.....	31
Kozlovskaya T., Golovenskiy V., Tiahnii V., Kyrychenko O., Tsarenko A. Factors of environmental condition normalization during aircraft operation..	43
Prykhodko V. Features of using the landgem model to determine methane emissions from municipal solid waste disposal sites.....	60
Okhariev V., Pidsadnii S. Technology of improving the land use data accuracy for geospatial modeling tasks.....	72
Magas N., Tomchenko O., Zahorodnia S., Sheviakina N. Biodiversity threat index: methodology and application for Emerald network sites under catastrophic flood conditions.....	83
Herchuk D. Conceptual model of a GIS-based recommendation system for sustainable heritage routes formation.....	95

CIVIL SAFETY

Maksymenko A., Klimova I. Analysis of current scientific research on methods of assessing the impact of industrial noise on workers and its negative health effects.....	105
---	-----

INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

Trofymchuk O., Bidyuk P., Tymoshchuk O., Huskova V., Kroptya A. Financial risk analysis in multidimensional systems	117
Ustimenko V., Pustovit O. On extremal algebraic graphs, Eulerian transformations and implementations of multivariate cryptosystems.....	135
Terentiev O., Prosyankina-Zharova T., Abroskin Yu., Duda V. Analysis methodology of pro-kremlin desinformation in internet news articles.....	154

Tymchuk V., Trysnyuk V., Khudoba V., Deliatynchuk A. Geo-information support of situational awareness in decision-making systems for security and crisis environments.....	161
Vyshniakov V., Liashchuk O., Mamariev V., Andrushchenko Yu., Koshlan O. Comprehensive information and earth-space monitoring of natural phenomena and man-manufactured disasters.....	172
Kazachkov I., Nesterenko O. Modelling and computer simulation of the turbulent two-phase jets of nano fluids.....	189
Mostovyy V., Korobenko A. Assessment of the impact of a damper pendulum on a steel cantilever member of a spatial structure.....	206
Horlynskyi B., Bondarenko D., Lysenko N., Maslennikova T., Kurbet P. Research the problem of using electronic signature to protect information with limited assess.....	219
Semko O., Vinnichuk D. Hybrid method for tracking moving objects in video streams under dynamic observation conditions.....	230
Gnatiuk S., Hrokholskyi Ja., Sakovich L. Chornobyl accident and military radio communications: analysis of organization and features of functioning...	238
Khudyntsev M., Khomenko O., Klymenkov O. Methodological basis of cyberinsurance risk assessment.....	251
Shevchenko D., Holub B., Trysnyuk T. Restoration of missing environmental data in an air quality monitoring system based on a naive Bayes classifier.....	262
Belous R., Mosiichuk D. A method for optimizing query routing in distributed databases to reduce latency and load.....	274
Krysenko P., Bektimirov A. The problem of IC50 prediction for ligand-protein pairs using Transformer architecture under limited resources.....	287
INFORMATION FOR AUTHORS	293

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

УДК 504.064.2

Mykhailo Popov¹, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Director, State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the NASU”
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1738-8227> **e-mail:** mpopov@casre.kiev.ua

Roman Ponomarenko², Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Institute
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8445-8251> **e-mail:** indcz@nuczu.edu.ua

Sergey Mosov², Dr. Sci. (Mil.), Professor, Senior lecturer
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0833-3187> **e-mail:** indcz@nuczu.edu.ua

¹State Institution “Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine”, Kyiv, Ukraine

²Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Kyiv, Ukraine

PEAT FIRES AS A GLOBAL ENVIRONMENTAL PROBLEM

Abstract. *The spread of peat fires in many countries has recently caused great concern worldwide. The reason is that peat fires release significant amounts of carbon dioxide into the atmosphere, which increases the greenhouse effect and negatively affects the climate. Smoke and ash released during peat burning have a harmful effect on human health and are especially dangerous for people with respiratory diseases. The increase in the number of peat fires is associated with climate change, which leads to drier conditions in forests, a decrease in the total amount of precipitation, as well as an increase in anthropogenic impact on nature. The actualization of the problem of peat fires, the growth of the dynamics of which can lead to a planetary environmental problem and its catastrophic consequences, has become an impetus for a systematic study of the situation with peat fires. The study is aimed at forming an interdisciplinary understanding of peatlands and peat fires in the modern world, clarifying their consequences and identifying possible environmental problems of the near future. Given the large-scale increase in peat fires in recent decades in many countries of the world, the authors set themselves the goal of systematizing knowledge about peat fires and their consequences in the context of a global environmental problem. The study is based on such methods as system analysis, statistical and historical methods, interdisciplinary approach, causal analysis, and others. The study provides a systematic description of many peatlands and clarifies the causes of peat fires in various regions of the world, including Ukraine. Directions of further research include the development of methods for remote detection of peat layers in the mode of weak smouldering, forecasting the dynamics of the occurrence and spread of peat fires taking into account the geological features of the territory. During the research, it is planned to develop a corresponding scientific and applied apparatus, as well as to use the capabilities of modern remote sensing technologies.*

Key words: *environment, peatland, burning, fire, ecosystem.*

М.О. Попов¹, Р.В. Пономаренко², С.П. Мосов²

¹Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, м. Київ, Україна

²Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, м. Київ, Україна

ТОРФ'ЯНІ ПОЖЕЖІ ЯК ГЛОБАЛЬНА ЕКОЛОГІЧНА ПРОБЛЕМА

Анотація. *Поширення торфових пожеж у багатьох країнах останнім часом викликає велике занепокоєння у всьому світі. Причина у тому, що торфові пожежі викидають в атмосферу значну кількість вуглекислого газу, що посилює парниковий ефект і негативно впливає на клімат. Дим і попіл, що виділяються під час горіння торфу, шкідливо впливають на здоров'я людини та є особливо небезпечними для людей із захворюваннями дихальних шляхів. Збільшення кількості торфових пожеж пов'язане зі зміною клімату, що призводить до посушливіших умов у лісах, зменшення загальної кількості опадів, а також збільшення антропогенного впливу на природу. Актуалізація проблеми торфових пожеж, зростання динаміки яких може призвести до планетарної екологічної проблеми та її катастрофічних наслідків, стала поштовхом до систематичного вивчення ситуації з торфовими пожежами. Дослідження спрямоване на формування міждисциплінарного розуміння торфовищ та торфових пожеж у сучасному світі, з'ясування їх наслідків та виявлення можливих екологічних проблем найближчого майбутнього. З огляду на масштабне зростання торфових пожеж за останні десятиліття в багатьох країнах світу, автори поставили собі за мету систематизувати знання про торфові пожежі та їх наслідки в контексті глобальної екологічної проблеми. Дослідження базується на таких методах, як системний аналіз, статистичний і історичний методи, міждисциплінарний підхід, причинний аналіз та ін. В дослідженні надано системну характеристику торфовищ, з'ясовано причини торфових пожеж у різних регіонах світу, включаючи Україну. Напрямки подальших досліджень включають розробку методів дистанційного виявлення торф'яних пластів у режимі слабкого тління, прогнозування динаміки виникнення та поширення торф'яних пожеж з урахуванням геологічних особливостей території. Під час дослідження планується розробити відповідний науково-прикладний апарат, а також використовувати можливості сучасних технологій дистанційного моніторингу природного середовища.*

Ключові слова: *природне середовище, торфовище, загоряння, пожежа, екосистема.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.7-17>

Вступ

Ми живемо в часи, коли проблеми довкілля та їх руйнівний вплив на людину стали очевидними, і сьогодні питання екології стоїть як ніколи гостро. До факторів, що потужно та негативно впливають на екологічну обстановку на нашій планеті, відносять торф'яні пожежі. Ці пожежі можуть виникнути через природні причини, такі як блискавка, або ж через дії людини, наприклад, неправильне використання вогню. Торф є дуже горючим матеріалом, який постійно тліє під землею на глибині до декількох метрів. При цьому торф'яні пожежі дуже складно гасити, тому що вони затяжні та можуть тривати протягом декількох місяців або навіть років.

Торф'яні пожежі мають серйозні наслідки як для навколишнього середовища, так і здоров'я людини. По-перше, вони призводять до викиду в атмосферу значної кількості вуглекислого газу, що підсилює ефект парникового газу та негативно впливає на клімат. По-друге, вони можуть призвести до знищення природних екосистем, включаючи рідкісні види рослин і тварин. По-третє, дим і попіл, що виділяються під час торф'яних пожеж, є шкідливими для здоров'я людини, особливо для людей із захворюваннями дихальної системи. На жаль, торф'яні пожежі стали все більш поширеними в останні роки. Це пов'язано з кліматичними змінами, які призводять до більш сухих умов у лісах і зменшення кількості опадів, а також зі збільшенням антропогенного впливу на природу.

Постановка завдання. Торфовища, як критично важливі поглиначі вуглецю та осередки біорізноманіття, розташовані на території 177 з 193 держав-членів ООН [1]. У зв'язку з цим сьогодні в усьому світі актуалізується проблема торф'яних пожеж, наростання динаміки яких здатне призвести до значного посилення загальної екологічної проблеми та її негативних наслідків для нашої планети. У зв'язку з цим системне дослідження торф'яних пожеж дозволить сформулювати багатопредметне уявлення про загальну ситуацію з торфовищами та торф'яними пожежами у світі, існуючими наслідками та можливою екологічною проблематикою найближчого майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання, пов'язані з дослідженням торфовищ і торф'яних пожеж та їхніх наслідків, розкриті в низці праць іноземних і вітчизняних фахівців та вчених: Г. Паркер (оцінка торф'яних пожеж з точки зору здоров'я та безпеки), Б. Мінаський, Д. Адецу та ін. (картографування та моніторинг стану торфовищ), Г. Рейн і С. Хуан (дослідження тліючих лісових пожеж на торфовищах у лісах та в Арктиці), Г. Рейн (питання довгого повільного горіння тліючих торф'яних мегапожеж), К. Маккартер, Г. Клей та ін. (торф'яні пожежі та вивільнення токсичних металів), П. Перкаса, С. Чалмерс та ін. (виявлення та геолокація торф'яних пожеж), М. Жижин, Ф. Хсу та ін. (ідентифікація тліючих торф'яних пожеж в Індонезії), В. Осадчий, А. Орещенко та ін. (спутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря), В. Лялько, О. Сибірцева та ін. (визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі) та інші.

Разом з тим, питання систематизації знань про торф'яні пожежі та їхні наслідки в площині глобальної світової екологічної проблеми є актуальними і вимагають проведення відповідного дослідження.

Мета дослідження. Систематизувати знання про торф'яні пожежі та їхні наслідки в площині глобальної світової екологічної проблеми.

Результати досліджень

За даними Міжнародного торф'яного товариства (International Peat Society, IPS), торфовища займають близько 3% площі нашої планети, або більш 400 млн га (рис. 1) [2, 3]. Вони зберігають майже 30% світового запасу вуглецю в ґрунті, що вдвічі перевищує кількість вуглецю, що міститься в лісах всього світу.

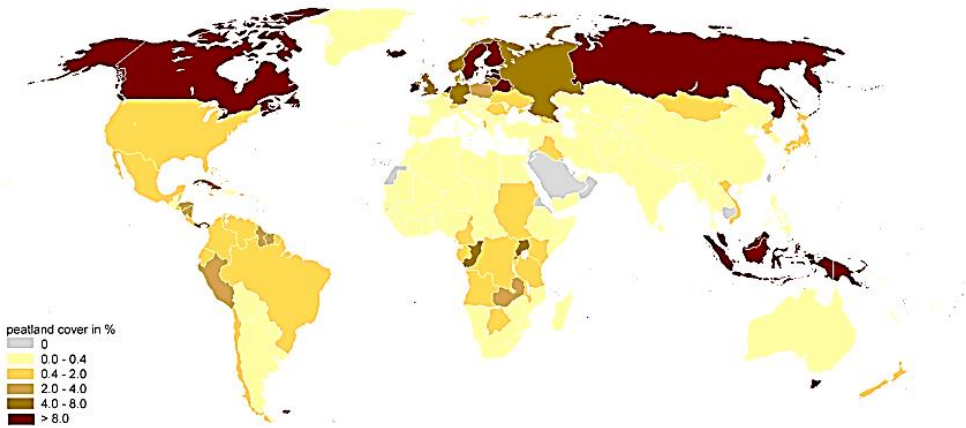


Рис. 1. Географічне розташування торфовищ [2]

У місцевому масштабі торфовища сприяють регулюванню та очищенню води, підтримують місцеве населення та знижують ризик пожеж, посух і повеней. Вони служать середовищем існування для понад тисячі вразливих, зникаючих і таких, що перебувають на межі зникнення, видів рослин і тварин. Повна залежність торфовищ від води для підтримки природних процесів робить їх надзвичайно важливими наземними екосистемами. Вони піддаються зростаючому тиску з боку антропогенного розвитку та посух.

Зазначений запас вуглецю знаходиться під загрозою, оскільки торфовища продовжують деградувати зі зростаючою швидкістю по всьому світу. Сільське господарство, урбанізація, вирубка лісів і промислова діяльність повсюдно піддають їх і забезпечувані ними найважливіші екосистемні послуги ризику: сьогодні близько 12% торфовищ світу осушені та деградували в результаті переобладнання для сільського господарства, лісового господарства, розвитку інфраструктури та інших цілей, що сприяє не менше 4% щорічних глобальних антропогенних викидів. Про це свідчить Глобальний атлас осередків торфовищ, опублікований Програмою ООН у 2024 р. із навколишнього середовища (ЮНЕП). В Атласі представлені докази необхідності посилення охорони та відновлення торфовищ, а також інвестицій у дослідження та моніторинг [1].

Загалом, 500 тис. га (~ 0,1%) незайманих торфовищ щорічно знищуються в результаті діяльності людини в таких гарячих точках, як Східна та Південно-Східна Азія, тоді як торфовища залишаються, в основному, незайманими в регіонах, віддалених від міжнародних ринків, у деяких (суб)арктичних, бореальних і тропічних зонах [5].

Як показує аналіз, торфовища досить різноманітні: від помірних болотистих місцевостей з відкритою безлісою рослинністю, таких як Flow Country в Шотландії, до болотистих лісів у Південно-Східній Азії [4]. Великі запаси торфу є в Індонезії, Канаді, РФ, Білорусі, Ірландії, Великій Британії та низці штатів США [2].

Достатньо велику площу – до 1 млн га – торф'яні родовища обіймають в Україні, при цьому їх найбільша кількість зосереджена у Поліссі (Житомирська, Рівненська, Чернігівська, Волинська області), а також у Київській області. У цілому торфіві ресурси України оцінюються у 2,17 млрд т [6].

Разом з тим людство продовжує відкривати нові торф'яні родовища. Так, у 2017 році в Африці під лісами басейну річки Конго (Заїр) було виявлене торф'яне родовище, яке за своєю площею перевершує всі відомі до цього тропічні торфовища.

Зберігаючи, захищаючи та відновлюючи торфовища по всьому світу, людство може значно скоротити викиди та відродити ключові екосистеми, що містять найвищі запаси вуглецю на гектар серед усіх природних екосистем у світі. Питання збереження та відновлення торфовищ відображено в багатьох глобальних політичних документах (Рамсарська конвенція [7], Глобальна ініціатива торфових боліт [8], Стратегія збереження біорізноманіття [9] тощо).

На реалізацію вимог, сформульованих у зазначених документах, спрямовані введені Євросоюзом у 2022 році правила сталого управління торфовищами, виконання яких стимулює інвентаризацію запасів вуглецю та динаміки торфовищ і, як передбачається, забезпечить скорочення чистих викидів парникових газів на 55% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року, а також досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року [10].

Отже, торфовища – це потужний природний актив, який традиційно використовується місцевим населенням і знаходить досить широке застосування в промисловості та сільському господарстві.

З іншого боку, викиди різних газів і дрібнодисперсних частинок, що супроводжують осушення торфовищ, а також продукти неповного розкладання рослинної маси в умовах надмірної вологості та недостатньої аерації серйозно забруднюють атмосферне повітря [11]. Викиди шкідливих газів та токсичних частинок в атмосферу – екологічні наслідки пожеж на торфовищах.

У природних умовах приповерхневий шар торфу знаходиться під впливом опадів та сонячного випромінювання. У процесі такого впливу вологовміст торфу в результаті конвективно-кондуктивного теплообміну з приземним шаром атмосфери поступово зменшується, досягаючи в деякий момент значення менше критичного. У певній мірі нагрітий і висушений шар торфу стає чутливим до підпалу. Вважається що торф стає здатним до займання при вологості менш 73%, а якщо вологість зменшується до 40%, то торф стає легкозаймистим [12].

Підпалювач може бути природним або, на жаль, антропогенним. Природними підпалювачами можуть бути удари блискавки в суху грозу, вогняні іскри низової лісової пожежі або ін. Антропогенні підпалювачі – необережне поводження людини з вогнем, іскри з несправних глушників проїжджаючого автотранспорту, рідке паливо, окремі різновиди сміття тощо. Підпал призводить до займання, що проявляється у вигляді тління (повільного безполуменового горіння) або відкритого вогню (полум'яного горіння). Іноді, при температурах вище за 50°C, може відбуватися самозаймання торфу, причиною якого є екзотермічні теплові, хімічні та мікробіологічні процеси.

Тління – типова форма горіння у торф'яних ґрунтах. Горіння в режимі тління відбувається як за рахунок кисню, що надходить разом з повітрям, так і за рахунок його виділення при термічному розкладанні матеріалу, що загоряється. Порівняно з полум'яним горінням, тління протікає безполум'яно і характеризується нижчими показниками: температурою; швидкістю поширення; швидкістю виділення тепла.

Тліючі торф'яні пожежі стають глобальною проблемою, оскільки вони спричиняють значне забруднення повітря, викидають дуже великі обсяги вуглецю, їх важко виявити та загасити, і вони можуть прискорити зміну клімату на нашій планеті. При достатній кількості кисню, помірного вітрі, наявності шляхів поширення вогню безполуменеве горіння поступово переходить в полум'яне, тобто виникає торф'яна пожежа. Наслідки подальшого і активного розповсюдження торф'яної пожежі – це небезпечно для людей погіршення якості повітря.

У сучасному світі в стадії горіння опиняються щороку сотні тисяч кубометрів торфу. Торф'яні пожежі можуть досягати дуже великих розмірів і спалювати величезну кількість палива, у багато разів більше, ніж палаючі пожежі. Пожежі на торфовищах можуть викидати більше парникових газів, ніж будь-який інший тип пожежі – до 10 разів більше вуглецю на гектар, ніж звичайні лісові пожежі. При цьому слід враховувати, що торф'яні пожежі відрізняються від інших пожеж своєю тривалістю.

Найбільш потерпілими від торф'яних пожеж є екосистеми Європи, помірні та бореальні ліси в РФ, на Британських островах і в Скандинавії. Відомими постраждалими регіонами в іншому світі є Північна Америка (зокрема, Канада, Аляска і Флорида), південь Австралії і Центральна Африка [13].

Торф'яні пожежі відбуваються з різною частотою по всьому світу в тропічних, помірних і бореальних регіонах. Не є рідкістю торф'яні пожежі, що тривають кілька місяців, як, наприклад, мегапожежі на Борнео в Індонезії в 1997 році, у дельті річки Окаванго в Ботсвані в 2000 році або на Еванс-роуд у Північній Кароліні (США) у 2008 році. Торф'яна мегапожежа 1997 року на Борнео призвела до екстремального димового явища. Дим покритив більшу частину Південно-Східної Азії, досягнувши навіть Австралії та Китаю, і викликав сплеск респіраторних захворювань у населення і порушення судноплавства та авіаперевезень на кілька тижнів [14].

У 2010 році кілька сотень пожеж на бореальних торфовищах на осушених і розроблюваних російських торфовищах не тільки ускладнили та здорожили гасіння пожеж, але і викликали димове забруднення, яке призвело до більш ніж 3 тис. додаткових смертей [15].

В останні роки торф'яні пожежі привернули увагу урядів і неурядових організацій, оскільки становлять не тільки екологічну, але й економічну проблему, особливо в густонаселених регіонах Південно-Східної Азії [16]. Серед таких проблем – втрати та пошкодження майна на урбанізованих територіях, втрачання лісових ресурсів, погіршення біорізноманіття тощо (рис. 2).

Лісові пожежі на торфовищах можуть бути викликані горінням пористих видів палива, рослинності та сміття. Вони можуть поширюватися глибоко в ґрунт і повільно горіти протягом тривалого часу. Торф'яні пожежі можуть досягати дуже великих розмірів і спалювати величезну кількість палива, у багато разів більше, ніж палаючі пожежі. Неповне згорання, що відбувається під час торф'яних пожеж, означає, що в атмосферу викидається безліч токсичних частинок, що призводить до погіршення якості повітря для людей і тварин у постраждалих районах.

Посухи, осушення та зміни в землекористуванні вважаються основними причинами, що призводять до високої займистості сухих торфовищ. Причиною спалахування більшої частини торф'яних пожеж є практика

підсічно-вогневої вирубки, що масово має місце, наприклад, у Південно-Східній Азії та призводить до швидкого очищення рослинності для плантацій. Можливі події загоряння можуть бути природними (наприклад, удар блискавки, самонагрівання, виверження вулкана) або антропогенними (неправильне землекористування, випадкове загоряння, підпал тощо). У бореальних регіонах причиною пожеж на торфовищах є дії людини та блискавки, кожна з яких спричиняє близько 50% загорянь [17].

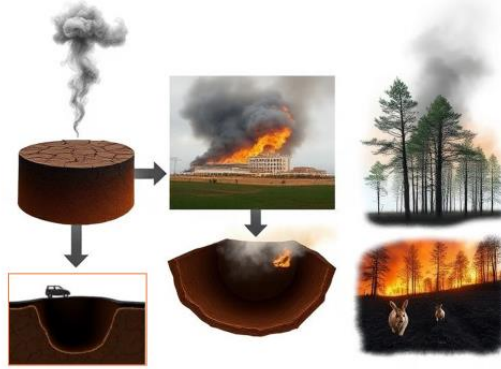


Рис. 2. До наслідків торф'яних пожеж

У тропічних країнах, таких як Індонезія, величезною проблемою є повторювані великомасштабні торф'яні пожежі [18]. Вони можуть тривати тижнями та викликати великі епізоди забруднення повітря (значну димку). Це ілюструють руйнівні наслідки пожеж, наприклад, 2015 року, в яких згоріла площа 4,6 млн га. Ці пожежі призвели до економічних втрат для мільйонів індонезійців. Світовий банк підрахував, що десятки млн людей страждали від серйозних проблем зі здоров'ям. Рецензоване дослідження підрахувало, що 69 млн людей піддавалися впливу димового забруднення протягом трьох місяців, а в результаті цих пожеж сталося більше 100 тис. смертей [19, 20]. На додаток до людської трагедії, втрата стількох життів призвела до величезних довгострокових економічних втрат для країни.

У 2019 році потужні торф'яні пожежі місяцями вирували по всій Індонезії, знищивши понад 3 млн га землі – приблизно площу Бельгії – і огорнувши шість сусідніх країн отруйним димом [21].

Торфовищами вкриті 9% території Великої Британії, які в здоровому стані видаляють з атмосфери понад 3 млн т вуглекислого газу на рік. Дослідники виявили, що “пожежний сезон” у країні, коли пожежі трапляються на природних територіях, значно збільшився з 2011 року: з одного-чотирьох місяців у 2011–2016 роках до шести-дев'яти місяців у 2017–2021 роках. Ця зміна особливо помітна в Шотландії, де відбувається майже половина всіх пожеж у Великій Британії. Дослідники також підраховали, що в результаті пожеж на торфовищах Великої Британії в період 2001–2021 років було викинуто в атмосферу 800 тис. т вуглецю. У результаті пожежі на болотах Седдлворт у 2018 році було викинуто 24 тис. т вуглецю, а в результаті пожежі на болотах Флоу-Кантрі в 2019 році в результаті спалювання торфу було викинуто 96 тис. т вуглецю [22].

На території Канади знаходиться чверть світових торфовищ. Більша частина канадських торфовищ знаходиться в зоні бореальних лісів, де поширені такі дерева, як чорна ялина, схильна до загоряння. Наявність цих дерев, а також багаті запаси вуглецю в ґрунті роблять торфовища дуже пожежонебезпечними, особливо в посушливі періоди. Попередні оцінки фахівців показують, що торф'яні пожежі на заході Канади щорічно викидають близько 6 тераграмів (мільйонів метричних тонн) вуглецю. У цілому, лісові пожежі по всій Канаді щорічно викидають близько 27 тераграмів вуглецю в повітря. Це означає, що торф'яні пожежі можуть робити значний внесок у загальнонаціональні викиди вуглецю. Глибокі торф'яні пожежі можуть призвести до ще більших викидів, оскільки щільність вуглецю в торфі експоненційно збільшується з глибиною. Кількість дуже великих пожеж (≥ 100 тис. га) і пожеж, що виникають наприкінці вегетаційного періоду, коли рівень ґрунтових вод торфовищ зазвичай низький по всій Північній Америці, щорічно збільшується [23, 24].

Незважаючи на те, що торфовища займають лише 1,2% від загальної площі суші США (приблизно 3,7 млн кв. миль), вони містять близько 20% вуглецю, що зберігається в ґрунті країни, – приблизно стільки ж вуглецю, скільки щорічно поглинають 60 млрд акрів лісів. Повністю або частково осушені торфовища вразливі до таких факторів стресу, як посуха та лісові пожежі. Так, наприклад, пожежа на Еванс-роуд у 2008 році на сході Північної Кароліни, що сталася на території деградованих торфовищ, обійшлася штату в \$20 млн тільки на гасіння пожеж [25].

Екологічний стан території України також щорічно порушується торф'яними пожежами. При цьому має місце нерівномірна просторово-часова динаміка торф'яних пожеж з чіткою концентрацією в окремих регіонах Полісся та центральній частині країни. Загальна динаміка торф'яних пожеж за останні роки така: 2020 рік – 440; 2021 рік – 79; 2022 рік – 181; 2023 рік – 83; 2024 рік – 190 [26]. Найбільш пожежонебезпечними регіонами виявилися Київська, Львівська, Житомирська, Волинська та Полтавська області.

За результатами аналізу до ключових причин пожеж на торфовищах в Україні у період 2020–2024 років слід віднести: необережне поводження з вогнем – визначальна причина (70–94%); самозаймання торфу – стабільний природно-кліматичний чинник; підпали – соціально небезпечний, але кількісно обмежений фактор; воєнні чинники (боєприпаси) – зростаюча загроза. Отримані результати підтверджують, що переважна більшість торф'яних пожеж має антропогенне походження. Таким чином, Україна стикається з тими ж проблемами, що мають інші країни світу.

Висновки і перспективи подальших досліджень

Результати досліджень свідчать про надзвичайну важливість і терміновість підсилення боротьби з екологічними і економічними наслідками торф'яних пожеж у всьому світові. Це включає припинення деградуючої діяльності, такої як перетворення сільськогосподарських угідь та осушення, а також відновлення умов перезволоження, необхідних для утворення торфу. Дані показують, що це єдиний наземний варіант для безстрокового утримання вуглецю, який є економічно ефективним, і що будь-які викиди від відновлення більш ніж компенсуються в довгостроковій перспективі.

Реальний перелом ситуації, що склалася, може бути досягнутий лише за умови повного досягнення цілей, резолюцій і стратегічних дій, сформульованих у Програмі ООН з навколишнього середовища, Рамсарській конвенції, програмних документах Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН тощо. До них належать: оцінка розподілу та стану торфовищ у світі; вимірювання та звітність про викиди з торфовищ; захист та відновлення торфовищ за допомогою цільових інвестицій; стимулювання ринкових механізмів підтримки торфовищ; залучення та підтримка місцевих громад до сталого управління торфовищами та подолання пов'язаних з цим витрат; обмін досвідом та знаннями щодо збереження, відновлення та покращення управління торфовищами.

Необхідно встановити чіткі та амбітні цілі щодо повторного зволоження та відновлення торфовищ, а захист торфовищ має бути включений до національних планів адаптації для виконання зобов'язань за Паризькою угодою. Державне та приватне фінансування має бути мобілізоване для збереження торфовищ та створення зелених робочих місць.

Виконання таких багатопланових і ємних робіт неможливо без щільної співпраці відповідних спеціалістів і організацій як на міжнародному, так і на національному рівнях. У зв'язку з цим, актуальними напрямками подальших досліджень слід вважати розробку методик дистанційного виявлення шарів торфу в режимі слабкого тління, надійних методів оцінювання ступеня готовності торфу до займання та розповсюдження, прогнозування динаміки виникнення та розповсюдження торф'яної пожежі з урахуванням геологічних особливостей території тощо.

Важливим напрямком перспективних досліджень на шляху радикального розв'язання проблеми торф'яних загорянь (пожеж) як у світі, так і в Україні, має стати розробка науково-прикладного апарату виявлення торф'яних загорянь на ранніх стадіях із залученням сучасних технологій дистанційного моніторингу природного середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Peatlands degrading in 177 countries, putting climate goals at risk. UNEP. (2024, November 21). Retrieved from <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/peatlands-degrading-177-countries-putting-climate-goals-risk>
2. Charman, D. (2002). *Peatlands and Environmental Change*. Chichester: John Wiley & Sons.
3. Parker, G. (2020, September 29). Assessing peat fires for health and safety. Retrieved from <https://apfinag.com/assessing-peat-fires-for-health-and-safety>
4. Hooijer, A. (2016). In the line of fire: the peatlands of Southeast Asia. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 371 (1696). Retrieved from <https://royalsocietypublishing.org/rstb/article/371/1696/20150176/22893/In-the-line-of-fire-the-peatlands-of-Southeast> <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0176>
5. Minasny, B., Adetsu, D.V., Vigah, D. et al. (2024). Mapping and monitoring peatland conditions from global to field scale. *Biogeochemistry*, 167, 383-425, <https://doi.org/10.1007/s10533-023-01084-1>
6. Lyalko, V.I., Dugin, S.S., Sybirtseva, O.M. et al. (2023). On the Possibility of Identifying Peatland Features Using Remote Sensing Data. *Geological Journal*, 4, 61-78. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>. [Лялько, В.І., Дугін, С.С., Сибірцева, О.М., Дорофей, Є.М., Голубов, С.І., Орленко, Т.А. (2023). Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Геологічний журнал*, 4, 61-78].

7. Convention on Wetlands of International Importance especially as Waterfowl Habitat (2022). Website of UNESCO. Retrieved from <https://www.unesco.org/en/biodiversity/wetlands>
8. Global Peatlands Initiative (2025). Website of GPI. Retrieved from <https://globalpeatlands.org>.
9. EU Biodiversity Strategy for 2030. (2020). Website of EC. Retrieved from <https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030>
10. European Commission Green deal: pioneering proposals to restore Europe's nature by 2050 and halve pesticide use by 2030. (2022). Website of EC. Retrieved from https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3746
11. Osadchyi, V., Oreshchenko, A. & Savenets, M. (2023). *Suputnykovyi monitorynh pozhhez i zabrudnennia atmosferного povitria* [Satellite monitoring of fires and atmospheric pollution]. Kyiv: SESU, NASU. (in Ukrainian) [Осадчий, В., Орещенко, А., Савенець, М. (2023). Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря. Київ: ДСНС України, НАН України, УкрГМІ].
12. Lishchenko, L.P. & Pazynych, N.V. (2016). Monitorynh stanu torfovyyshch dla vyivlennia pozhzhonebezpechnykh dilianok za dopomohoiu dystantsiinykh metodiv [Monitoring the condition of peatlands to identify fire-hazardous areas using remote methods]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli*, 8, 29-39. (in Ukrainian) <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.210>. [Ліщенко, Л.П., Пазинич, Н.В. (2016). Моніторинг стану торфовищ для виявлення пожежонебезпечних ділянок за допомогою дистанційних методів. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8, 29-39].
13. Rein, G. & Huang, X. (2021). Smouldering wildfires in peatlands, forests and the arctic: Challenges and perspectives. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 24. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468584421000684>
14. Rein, G. (2014, June 16). The long slow burn of Smouldering peat mega-fires. Retrieved from <https://www.iawfonline.org/article/the-long-slow-burn-of-smouldering-peat-mega-fires>
15. McCarter, C.P., Clay, G.D., Wilkinson, S.L. et al. (2024). Peat fires and legacy toxic metal release: An integrative biogeochemical and ecohydrological conceptual framework. *Earth-Science Reviews*, 256. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104867>
16. Page, S.E. & Hooijer, A. (2017). In the line of fire: The peatlands of Southeast Asia. *Philos. Trans. R. Soc.*, 317 (1696). <https://doi.org/10.1098/rstb.2015.0176>
17. Sam-Odusina, T., Perkasa, P., Chalmers, C. et al. (2025). Detection and Geolocation of Peat Fires Using Thermal Infrared Cameras on Drones. *Drones*, 9(7), 459. <https://doi.org/10.3390/drones9070459>
18. Carmenta, R., Zabala, A. & Phelps, J. (2015). Indonesian Peatland Fires. Perceptions of Solutions. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4296.5849>
19. Lohberger, S., Stängel, M., Atwood, E.C. & Siegert, F. (2017). Spatial evaluation of Indonesia's 2015 fire-affected area and estimated carbon emissions using Sentinel-1. *Glob. Change Biol*, 24, 644-654. <https://doi.org/10.1111/gcb.13841>
20. Crippa, P., Castruccio, S., Archer-Nicholls, S. et al. Population exposure to hazardous air quality due to the 2015 fires in Equatorial Asia, *Scientific Reports* | 6:37074 |. <https://doi.org/10.1038/srep37074>
21. The burning issue of peat fires. (2025, April 02). Retrieved from <https://geographical.co.uk/news/the-burning-issue-of-peat-fires>
22. UK peatland fires are supercharging carbon emissions as climate change causes hotter, drier summers (2025, February 21). Retrieved from <https://www.cam.ac.uk/research/news/uk-peatland-fires-are-supercharging-carbon-emissions-as-climate-change-causes-hotter-drier-summers>
23. Peatland fires and carbon emissions. (2025, March 05). Retrieved from <https://natural-resources.canada.ca/forest-forestry/wildland-fires/peatland-fires-carbon-missions>

24. Wildfires send Canada's carbon emissions soaring. (2025, July 20). Retrieved from <https://www.cbc.ca/news/science/new-model-to-estimate-emissions-from-canada-peatlands-1.758880312>
25. Peatlands Play a Vital Ecological and Economic Role in the U.S. (2025, May 30) Retrieved from <https://www.pew.org/en/research-and-analysis/issue-briefs/2025/05/peatlands-play-a-vital-ecological-and-economic-role-in-the-us>
26. Koval, R. (2025). *Doslidzhennia statystychnykh danykh shchodo pozhezh torfianykh zahorian, prychyn yikh vynyknennia na terytorii Ukrainy* [Research on statistical data concerning peat fires and the causes of their occurrence in Ukraine]. Kyiv: ISRCPU NUCPU. (in Ukrainian) [Коваль, Р. (2025). Дослідження статистичних даних щодо пожеж торф'яних загорянь, причин їх виникнення на території України. Київ: ІНДЦЗ НУЦЗУ].

Стаття надійшла до редакції 02.02.2026, надійшла після рецензування 03.04.2026, прийнята 21.04.2026

The article was received 02.02.2026, received after revision 03.04.2026, accepted 21.04.2026

Попов Михайло Олексійович

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, директор, Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”

Адреса робоча: вул. Олеся Гончара, 55-б, Київ, 01054, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1738-8227> **e-mail:** mpopov@casre.kiev.ua

Пономаренко Роман Володимирович

доктор технічних наук, професор, начальник, Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Адреса робоча: вул. Вишгородська, 21, Київ, 04074, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8445-8251> **e-mail:** indcz@nuczu.edu.ua

Мосов Сергій Петрович

доктор військових наук, професор, старший викладач, відділення підготовки операторів безпілотних систем і робототехніки Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України

Адреса робоча: вул. Вишгородська, 21, Київ, 04074, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0833-3187> **e-mail:** indcz@nuczu.edu.ua

УДК 532.593.5

Volodymyr Voskoboinyk¹, DSci, Head of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2161-6923> **e-mail:** vlad.vsk@gmail.com

Oleksii Lebid², DSci, Deputy Director for Scientific Research of Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> **e-mail:** o.g.lebid@gmail.com

Oleksandr Voskoboinyk¹, PhD, Associate professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-4433> **e-mail:** alexandr.vsk@gmail.com

Yurii Merenger¹, PhD Student of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8595-6622> **e-mail:** YuriMer@gmail.com

Sofiia Voskoboinik³, Student of the Department of Information Technology, Artificial Intelligence, and Cybersecurity of National University of Food Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-8829-7588> **e-mail:** ivosk3@gmail.com

¹Institute of Hydromechanics of the National academy sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

³National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

INFLUENCE OF PERMEABLE PILE BREAKWATER ON SURFACE WAVES

Abstract. Laboratory experimental researches were conducted to study the influence of the pile shape of permeable vertical breakwater on the formation and transformation of surface waves. The experiments conducted in a wave channel, where waves of different heights, periods and wavelengths were generated, with permeable breakwaters of a fuel structure with piles of circular, square and triangular cross-section. The use of a group of sensors made it possible to determine the features of wave transformation during their interaction with single-row permeable vertical walls. Regardless of the direction of the frontal surface of the square cross-section piles of permeable breakwaters, the height of the reflected and transmission surface waves increased and the increase coefficient increased with increasing steepness of the incoming wave. The height of the reflected wave significantly exceeded the height of the transmission wave. With increasing permeability of the vertical single-row pile breakwater, the steepness of the reflected wave decreased, and the steepness of the transmission wave, on the contrary, increased. The highest ratios between reflected wave heights and transmitted wave heights as a function of normalized wave number were recorded for breakwaters with a permeability of 20%, which consisted of square-section piles, where the side of the square was directed towards the incoming wave. The lowest ratios between reflected wave heights and transmitted wave heights as a function of wave number were observed for breakwaters with a permeability of 50%, which consisted of square-section piles, where the edge of the pile was directed towards the wave.

Key words: surface wave, permeable breakwater, square cross-section piles, wave height sensors, reflected and transmission waves, wave energy dissipation.

В.А. Воскобійник¹, О.Г. Лебідь², О.А. Воскобойник¹,
Ю.П. Меренгер¹, С.І. Воскобойнік

¹Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України,
м. Київ, Україна

³Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна

ВПЛИВ ПРОНИКНОГО ПАЛЬНОГО ХВИЛЕЛОМУ НА ПОВЕРХНЕВІ ХВИЛІ

Анотація. Проведено лабораторні експериментальні дослідження з метою визначення впливу проникного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу на формування та трансформацію поверхневих хвиль. Досліди проводилися у хвильовому каналі, де генерувалися хвилі різної висоти, періоду та довжини хвилі, з проникними хвилеломами пальної конструкції з палями квадратного поперечного перерізу. Використання групи датчиків дозволило визначити особливості трансформації хвиль під час їх взаємодії з однорядними проникними вертикальними стінками. Незалежно від напрямку фронтальної поверхні палі квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів висота відбитої та проникної поверхневих хвиль збільшувалася і коефіцієнт збільшення наростає зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. Висота відбитої хвилі значно перевищувала висоту проникної хвилі. Зі збільшенням проникності вертикального однорядного пального хвилелому крутизна відбитої хвилі зменшувалася, а крутизна проникної хвилі навпаки збільшувалася. Найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від нормованого хвильового числа реєструвалися для хвилеломів проникністю 20%, які склалися з палі квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч прийдешній хвилі. Найменші відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від хвильового числа спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з палі квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі.

Ключові слова: поверхнева хвиля, проникний хвилелом, палі квадратного поперечного перерізу, датчики висоти хвиль, відбиті та проникні хвилі, дисипація хвильової енергії.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.18-30>

Вступ

Наявність парникового ефекту, через накопичення парникового газу, внаслідок інтенсивного спалювання викопних вуглецевих корисних копалин, вирубки лісів, промислових відходів та іншої діяльності людства, призводить до підвищення температури та значного потепління клімату на Землі, а відповідно танення льодовиків і підвищення рівня Світового океану. Все це призводить до розмивання прибережної зони, підтоплення поселень та гідротехнічних споруд. Внаслідок підвищення рівня морських та океанських акваторій збільшуються висоти морських хвиль, чисельність та інтенсивність штормів і тайфунів, що вимагає покращення засобів і конструкцій берегозахисних споруд, їх ефективності та можливості захистити берег від розмивів і ерозії ґрунтів, критичної прибережної інфраструктури, місць проживання та відпочинку населення багатьох морських країн [1-4].

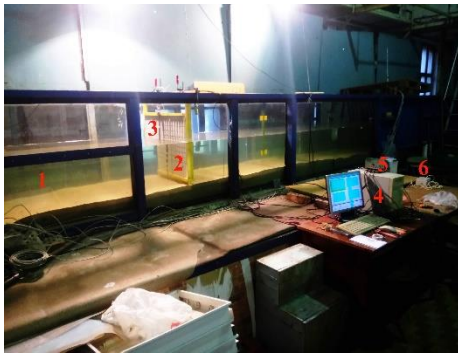
В якості берегозахисних споруд в морській інженерії широко використовуються хвилеломи або хвилерізи для розсіювання енергії хвиль, які взаємодіють з береговою лінією та прибережною інфраструктурою. Хвилеломи – це важливі об’єкти приморської інфраструктури, які захищають берегові лінії, гавані, пляжі та морські споруди від тривалого впливу поверхневих хвиль, що суттєво підтримує регіональну структурну стабільність та екологічну рівновагу. Хвилеломи будуються з надводною частиною, занурені та ті, які знаходяться в плавучому стані та закріплені до морського дна якорями. В останній час широкого розповсюдження набули проникні хвилеломи в якості пластинчатих, пальних та перфорованих конструкцій, які достатньо ефективні під час експлуатації, економічно більше вигідні та значно поліпшують екологію в місці їх розташування. Гідравлічна ефективність пористих хвилеломів визначається їхньою геометрією, пористістю та взаємодією рідини хвильового поля та берегозахисної структури. Такі хвилеломи зменшують негативний вплив їх застосування на прибережні екосистеми, зменшують застій води на підвітряному березі та покращують якість води у захищених акваторіях. Вони приводять до значної дисипації енергії хвиль, що обумовлено процесом трансформації та розбиття хвиль, а також механізмом тертя водних мас, які переміщуються хвильовим рухом через щілини проникних хвилеломів. Попередні дослідження, результати яких опубліковані в фахових виданнях та доповідалися на спеціалізованих симпозіумах і конференціях [5-9], ретельно вивчали особливості та характеристики розсіювання хвиль проникними хвилеломами з використанням теоретичного аналізу, модельних експериментів, числового і фізичного моделювання та під час натурного використання таких хвилеломів.

В роботі [10] проведено комплексний огляд характеристик трансформації хвиль різними типами хвилеломів у морській інженерії та їх берегозахисних властивостей. Відмічено, що сучасні хвилеломи будуються з застосуванням нових передових матеріалів і конструкцій з метою підвищити ефективність експлуатації та зменшити матеріальні та фінансові витрати. Серед широкого класу побудованих і проєктованих хвилеломів в залежності від їх властивості відбивати, пропускати та розсіювати енергію хвиль, фізичних та експлуатаційних властивостей треба виокремити найбільше популярні типи хвилеломів, а саме вертикальні, похилі, плавучі, затоплені та проникні хвилеломи, кожний з цих типів хвилеломів має свої переваги та недоліки під час експлуатації та ефективної роботи в якості берегозахисних споруд [11-15]. Вибір типу хвилелому залежить від багатьох факторів, основними з яких є хвильові умови експлуатації, топографія дна та вплив на оточуюче середовище. В роботі прогнозується, що успіхи в розробці, виготовленні та застосуванні нових матеріалів, дизайні хвилеломів та технологіях їх виготовлення і експлуатації покращать характеристики хвилеломів з врахуванням місцевих умов їх розташування та вимог для забезпечення ефективного захисту берегових ліній, критичної інфраструктури та морських гідротехнічних споруд.

Мета роботи – визначення впливу проникного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу на формування та трансформацію поверхневих хвиль в лабораторних умовах.

Програма та методика досліджень

Визначення впливу проникної пальної стінки з палями квадратного поперечного перерізу, в яких сторона квадрату направлена назустріч напрямку хвилі, та особливостей трансформації гравітаційних хвиль поблизу них проводилося за допомогою візуальних досліджень та вимірюванням висот хвиль перед фронтальною частиною вертикальної стінки та позаду неї. Візуальні дослідження за допомогою фотоапаратури та відеокамер дозволили оцінити характерні особливості поведінки хвильового поля в досліджуваних областях. Інструментальні дослідження за допомогою датчиків висоти хвиль, а також датчиків пульсацій тиску дозволили визначити кількісні параметри хвильового руху та поля пульсацій хвильового тиску поблизу суцільних і проникних вертикальних стінок [16-18]. Для виконання цих наукових робіт було створено експериментальний стенд на базі хвильового каналу і досліди проводилися в лабораторних умовах. Основні параметри стенду та його можливості більше детально було опубліковано в роботах [19].



а



б

Рис. 1. Експериментальний стенд (а) та проникний хвилелом з палями квадратного поперечного перерізу проникністю 50% (б)

Експериментальні дослідження проводилися в хвильовому каналі довжиною близько 50 м, де на відстані близько 40 м від щитового генератора хвиль було зроблено вимірювальну ділянку (рис. 1а). Дно цієї ділянки було засипано кварцовим піском на висоту 0,2 м і на піску розташовували моделі досліджуваних вертикальних стінок (рис. 1а). В кормовій частині хвильового каналу було встановлено укiсний щiлинний поглинач хвиль. Хвильовий канал заповнювався водою на глибину 0.4 м або 0.5 м над піщаним дном (кварцовий пісок товщиною 0.2 м) в залежності від виконуваних дослідних робіт. Бокові стінки каналу були виготовлені з протиударного скла для проведення візуальних досліджень та відео- й фотозйомки. Ширина каналу складала 1.0 м і висота каналу була також 1.0 м. В середині хвильового каналу (1), як показано на рис. 1а, було встановлено проникну вертикальну стінку (2) на піщане дно хвильового каналу. Перед проникною пальною стінкою та позаду неї розташовувалися спеціально розроблені та створені [19] датчики висоти хвиль (3). Моделі пальових конструкцій мали різну проникність і розташовувалися перпендикулярно напрямку руху хвиль від генератора хвиль щитової конструкції, як показано на рис. 1б.

Експериментальний стенд було обладнано контрольно-вимірювальною апаратурою, датчиками, координатними пристроями, системами фіксації датчиків, апаратурою реєстрації даних, комп'ютерною технікою (4). Електричні сигнали датчиків висоти хвиль фільтрувалися і підсилювалися відповідними підсилювачами (5), потім через 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач (6) подавалися на комп'ютер (4), де реєструвалися, а потім оброблялися та аналізувалися [19, 20]. Вимірювання висоти хвиль, а також хвильового тиску було здійснено за допомогою п'єзорезистивних датчиків динамічного тиску, фотографію яких наведено на рис. 1. П'єзорезистивні датчики динамічного тиску вимірювали тиск у тонкостінних трубках, які було занурено під поверхню води (рис. 1б). Під дією хвильового поля тиск в трубках змінювався у відповідності до параметрів хвиль і реєструвався цими високоточними (чутливість 2 Па) датчиками [3, 20].

Обробка і аналіз експериментальних даних було здійснено за допомогою спеціальної апаратури аналізу випадкових процесів або на комп'ютері за відповідними програмами і алгоритмами. Статистична обробка і аналіз результатів досліджень виконувалася з використанням математичного апарату теорії ймовірності та математичної статистики. В результаті було отримано і проаналізовано інтегральні, кореляційні та спектральні характеристики заміряних гідродинамічних параметрів хвильового поля та визначені характерні особливості взаємодії гравітаційних хвиль з проникними вертикальними стінками, які створено з паль квадратної поперечної форми.

Результати досліджень

На рис. 2 наведені результати вимірювання висот відбитих та проникних хвиль, нормованих глибиною води в хвильовому каналі (h^*/H), та коефіцієнтів трансформації хвиль, а саме, коефіцієнта відбиття хвиль (C_R), коефіцієнта проникнення хвиль (C_T) і коефіцієнта дисипації енергії хвиль (C_E) в залежності від крутизни прийдешньої хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу стороною назустріч хвилям. Номера кривих на рис. 2а наступні: крива 1 виміряна для відбитої хвилі від паль проникністю 20%, крива 2 – для відбитої хвилі від паль проникністю 50%, крива 3 – для проникної хвилі від паль проникністю 20%, крива 4 – для проникної хвилі від паль проникністю 50%, крива 5 – для прийдешньої хвилі. На рис. 2б перші дві криві – це коефіцієнти відбиття хвилі для стінок проникністю 20% та 50%, третя і четверта криві – це коефіцієнти проникнення хвиль для проникності вертикальної стінки 20% і 50%, а останні дві криві (крива 5 і крива 6) – це коефіцієнти дисипації енергії хвиль для проникності 20% і 50%.

Результати дослідження показали, що висоти відбитих та проникних хвиль збільшувалися незалежно від проникності пального хвилелому зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. При цьому темп збільшення висоти відбитої та проникної хвилі поступово зменшувався зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, як показано на рис. 2а. Нормовані висоти відбитих хвиль значно перевищували висоти проникних хвиль та висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшувалася зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. Зі збільшенням проникності однорядного вертикального пального хвилелому

висоти відбитих хвиль зменшувалися у порівнянні з хвилеломом меншої проникності, що випливає зі співставлення кривих 1 та 2 на рис. 2а. Висоти проникних хвиль мали протилежний характер зміни, а саме, висоти проникних хвиль для проникності 50% були вищими, ніж висоти проникних хвиль для пального хвилелому проникністю 20% (криві 3 та 4 на рис. 2а). Як показали результати досліджень, що наведені на рис. 2а, висота прийдешньої хвилі мала середні значення між висотами відбитих та проникних хвиль.

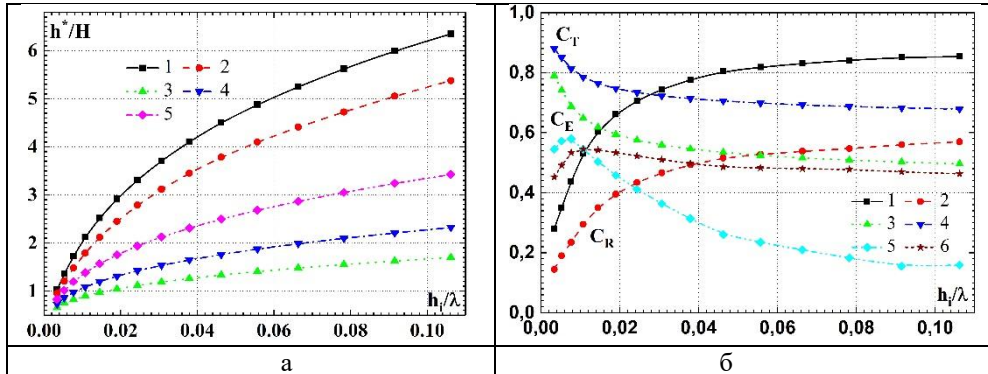


Рис. 2. Залежності висоти поверхневих хвиль (а) та коефіцієнтів трансформації хвиль (б) від крутизни початкової хвилі для проникної вертикальної стінки з пальями квадратного перерізу стороною назустріч хвилям

Результати дослідження висот відбитої та проникної хвилі дозволили визначити коефіцієнти трансформації поверхневої хвилі внаслідок її взаємодії з проникним вертикальним хвилеломом, який складався з паль квадратного поперечного перерізу, які представлено на рис. 2б. Так, коефіцієнти відбиття поверхневих хвиль, які визначалися за залежністю $C_R = h_R / h_i$, де h_R – висота відбитої проникним хвилеломом хвилі, а h_i – висота прийдешньої хвилі, яку генерував генератор хвиль у хвильовому каналі, збільшувалися зі збільшенням хвильового числа, а коефіцієнти проникнення хвиль ($C_T = h_T / h_i$, де h_T – висота проникної через хвилелом хвилі) навпаки зменшувалися зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, як показано на рис. 2б. Наряду з цим коефіцієнт відбиття хвилі був вищим в умовах проведення досліджень з проникністю хвилелому 20%, ніж з проникністю 50%. Коефіцієнт відбиття хвилі від поверхні паль квадратного поперечного перерізу на малих значеннях крутизни прийдешньої хвилі більш стрімко зростав для проникності хвилелому 20%, ніж для проникності 50%, а потім зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі $h_i / \lambda > 0.08$ виходив на плато зі значенням $C_R \approx 0.86$. Коефіцієнт проникнення хвилі навпаки був вищим для хвилелому проникністю 50%, ніж проникністю 20%. Це обумовлено тим, що проникний вертикальний пальний хвилелом, який мав незначну проникність, мав значний гідродинамічний опір проникненню хвиль, тому перед таким хвилеломом спостерігалися інтенсивні відбиті хвилі, що показано на рис. 2а, і, відповідно, значні коефіцієнти відбиття хвиль, як показано на рис. 2б, у порівнянні з проникним хвилеломом незначної проникності. Проникні хвилі та коефіцієнти проникнення хвиль мали протилежну тенденцію зміни гідродинамічних характеристик, що показано на рис. 2.

Коефіцієнти дисипації енергії хвилі, які розраховувалися за залежністю $C_E = \sqrt{1 - C_R^2 - C_T^2}$, показали, як розсіювалася або демпфувалася енергія прийдешньої хвилі внаслідок її взаємодії з проникним вертикальним однорядним хвилеломом. В області крутизни прийдешньої хвилі $h_i / \lambda \approx (0.3 - 0.5)$ спостерігалися екстремальні (максимальні) значення коефіцієнтів розсіювання енергії хвиль, які були вищими для проникності 20% пального хвилелому, ніж для його проникності 50%. При цьому екстремуми для меншої проникності та вищі показники дисипації хвильової енергії мали місце для менших значень крутизни прийдешньої хвилі. Так, зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі від діапазону екстремумів C_E коефіцієнт дисипації енергії хвилі зменшувався, як показано на рис. 2б, але темп зменшення цього коефіцієнта був вищий для хвилелому меншої проникності.

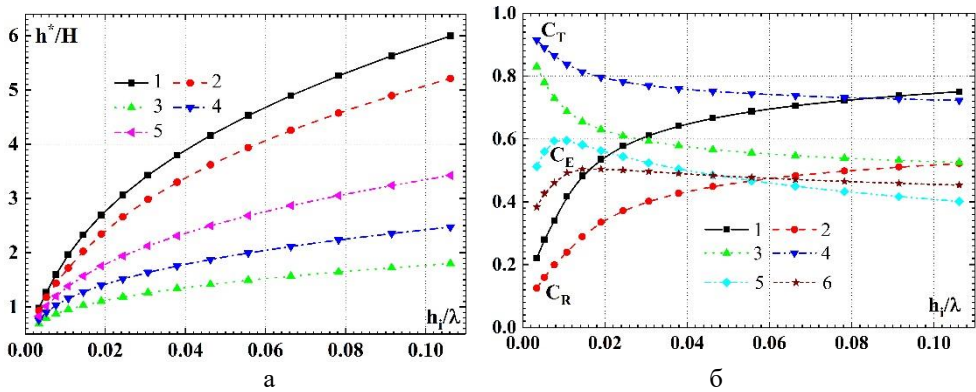


Рис. 3. Залежності висоти поверхневих хвиль (а) та коефіцієнтів трансформації хвиль (б) від крутизни початкової хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу ребром назустріч хвилям

На рис. 3 наведені результати вимірювання висот відбитих та проникних хвиль, нормованих глибиною води в хвильовому каналі, та коефіцієнтів трансформації хвиль в залежності від крутизни прийдешньої хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу ребром назустріч хвилям. Номера кривих на рис. 3а та на рис. 3б відповідають тим, що наведені на рис. 2а та на рис. 2б, але для паль квадратного перерізу, які направлено ребром назустріч хвилям.

Результати вимірювання висоти відбитих та проникних хвиль в залежності від крутизни прийдешньої хвилі для проникної вертикальної стінки з палями квадратного перерізу ребром назустріч хвилям, що представлені на рис. 3а, показали, що характер зміни крутизни поверхневих хвиль загалом не відрізнявся від того, що було отримано в попередніх результатах. Але значення висоти відбитих хвиль стали меншими, ніж в умовах дослідів з хвилеломом з палями квадратного поперечного перерізу та направленими сторонами назустріч напрямку хвиль, а висоти проникних хвиль навпаки незначно збільшилися для паль, в яких ребро було направлено назустріч напрямку хвилі, як було показано на рис. 2а та на рис. 3а.

Коефіцієнти відбиття хвилі на рис. 3б стали більшими, ніж на рис. 2б. Коефіцієнти проникнення хвиль через хвилелом з палями квадратного поперечного перерізу, де палі було направлено ребром до напрямку хвиль, мали вищі значення, ніж на рис. 2б для паль квадратного поперечного перерізу зі стороною направленою назустріч хвилі.

Коефіцієнти дисипації енергії хвиль в області малої крутизни прийдешньої хвилі в діапазоні $h_i / \lambda \approx (0.3 - 0.5)$ також мали максимальні значення (рис. 3б) подібно до даних вимірювання C_E в умовах пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу (рис. 2б). Але максимуми коефіцієнтів дисипації хвиль були вищими на рис. 3б, ніж на рис. 2б для проникності 20% та меншими для проникності 50% в умовах обтікання квадратних паль, де їх ребро було направлено назустріч хвилі. Зменшення коефіцієнта дисипації енергії хвиль спостерігалось з найбільшими темпами зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі для паль квадратного поперечного перерізу зі стороною квадрату, яка направлена назустріч напрямку хвиль (див., рис. 2б). Для проникності хвилелому 50% коефіцієнти дисипації енергії хвиль для паль квадратного поперечного перерізу мали приблизно однаковий характер поведінки (рис. 2б та рис. 3б).

На рис. 4 наведені результати співставлення висот відбитої та проникної хвилі для паль квадратного поперечного перерізу проникних вертикальних хвилеломів різної проникності та напрямку фронтальної поверхні паль в залежності від крутизни прийдешньої хвилі. Криві 1 та 2 отримані для паль, де сторона квадрату направлена назустріч напрямку хвиль та проникності 20% (крива 1) та 50% (крива 2). Криві 3 та 4 отримані для паль, де ребро квадрату направлено назустріч напрямку хвиль та проникності 20% та 50%, відповідно, крива 3 та крива 4. Крива 5 отримана під час вимірювання висот прийдешньої хвилі.

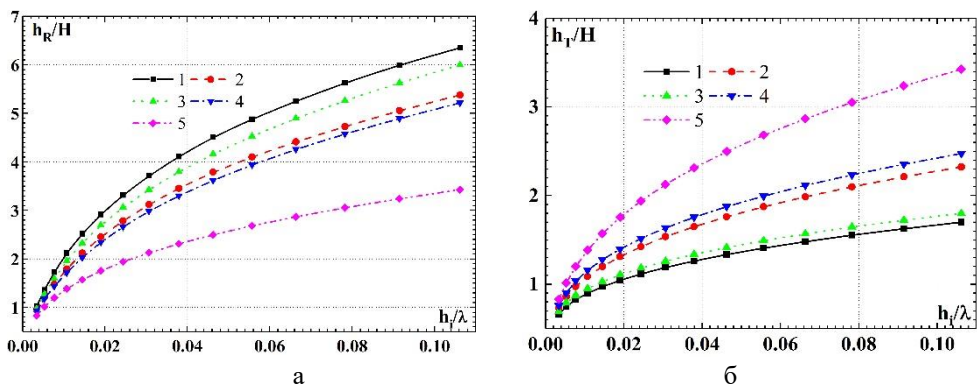


Рис. 4. Співставлення висот відбитої хвилі (а) та проникної хвилі (б) для паль квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів

Результати досліджень показали, що на хвилеломах з палями квадратної форми, в яких сторона квадрату направлена назустріч хвилі, мали вищі значення висоти відбитих хвиль, ніж на палях, де ребро паль було направлено назустріч хвилі, в усьому діапазоні зміни значень крутизни прийдешньої хвилі (рис. 4а). Треба зазначити, що різниця між висотами відбитих хвиль для досліджених форм паль була вищою для проникного хвилелому

проникністю 20%. Різниця між висотами відбитих хвиль та висотою прийдешньої хвилі збільшувалася зі збільшенням крутизни хвилі та зменшенням проникності пального хвилелому.

На рис. 4б наведені результати співставлення висот проникних через однорядний палий хвилелом хвиль для палів квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів, які показали, що висота проникної хвилі найбільша для проникності 50% та квадратних палів, в яких ребро направлено назустріч напрямку прийдешніх хвиль. Найменші висоти проникних хвиль зареєстровано для палів проникністю 20% та квадратних за формою поперечного перерізу палів, де сторона квадрату направлена назустріч хвилі. Різниця між висотами прийдешньої хвилі та висотами проникної хвилі збільшувалася зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, що показало більшу ефективність проникного пального хвилелому в якості берегозахисної споруди. При цьому берегозахисна ефективність однорядного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч хвилі, була найвищою і ця ефективність покращувалася зі зменшенням проникності хвилелому.

На рис. 5 представлені результати вимірювань відношення висоти відбитої хвилі до висоти проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешніх хвиль та від хвильового числа для однорядних проникних хвилеломів проникністю 20% та 50% з палями квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату або ребро палі було направлено назустріч прийдешній хвилі. Криві 1 і 2 отримані для квадратних палів, в яких сторона квадрату направлена назустріч напрямку хвилі, та проникності хвилелому 20% (крива 1) та 50% (крива 2). Криві 3 та 4 отримані для квадратних палів, в яких ребро палі направлено назустріч напрямку хвилі, та проникності хвилелому 20% (крива 3) та 50% (крива 4).

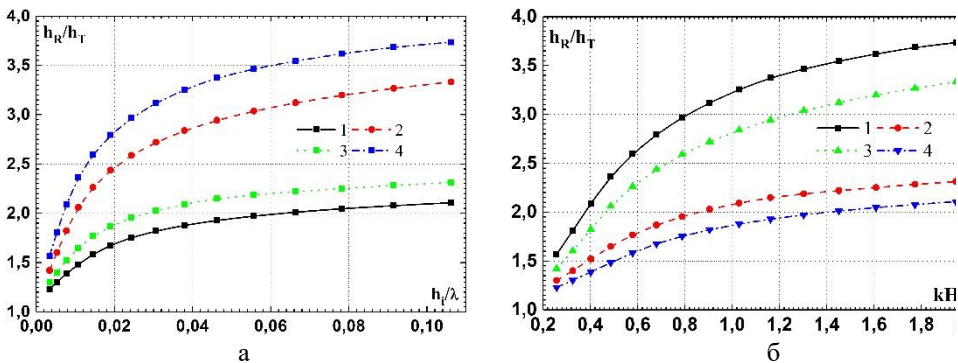


Рис. 5. Відношення висоти відбитої хвилі до висоти проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешніх хвиль (а) та від хвильового числа (б)

Результати досліджень, які наведено на рис. 5а, показали, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешньої хвилі спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які склалися з палів квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі. Найменші значення відношення між висотами відбитої та проникної хвилі мали місце для квадратних палів, в яких сторона квадрату була направлена назустріч хвилі, та для однорядного проникного

хвилелому проникністю 20%. Разом з тим, найвищі рівні відношення висот відбитої та проникної хвилі спостерігалися для хвилеломів проникністю 20% незалежно від форми поперечного перерізу паль відносно напрямку прийдешньої хвилі.

Результати досліджень, які наведено на рис. 5б, показали, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від нормованого хвильового числа реєструвалися для хвилеломів проникністю 20%, які складалися з паль квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч прийдешній хвилі. Найменші відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від хвильового числа спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які складалися з паль квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі.

Висновки

Результати експериментальних досліджень з визначення впливу проникного пального хвилелому з палями квадратного поперечного перерізу на формування та трансформацію енергії поверхневих хвиль показали:

1. Незалежно від напрямку фронтальної поверхні паль квадратного поперечного перерізу проникних хвилеломів висота відбитої та проникної поверхневих хвиль збільшувалася і коефіцієнт збільшення наростав зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі. Визначено, що висота відбитої хвилі значно перевищувала висоту проникної хвилі. Зі збільшенням проникності вертикального однорядного пального хвилелому крутизна відбитої хвилі зменшувалася, а крутизна проникної хвилі навпаки збільшувалася.

2. Установлено, що коефіцієнти відбиття поверхневих хвиль збільшувалися зі збільшенням крутизни прийдешньої хвилі, а коефіцієнти проникнення хвиль навпаки зменшувалися зі збільшенням крутизни хвилі. Наряду з цим коефіцієнт відбиття хвилі був вищим в умовах проведення досліджень з проникністю хвилелому 20%, ніж з проникністю 50%. Коефіцієнт проникнення хвилі навпаки був вищим для хвилелому проникністю 50%, ніж проникністю 20%.

3. Показано, що коефіцієнти дисипації енергії хвиль в області малої крутизни прийдешньої хвилі в діапазоні $h_i / \lambda \approx (0.3 - 0.5)$ мали максимальні значення, а зі збільшенням крутизни хвилі коефіцієнт дисипації енергії хвилі зменшувався, але темп зменшення цього коефіцієнта був вищий для хвилелому меншої проникності.

4. Визначено, що на хвилеломах з палями квадратної форми, в яких сторона квадрату направлена назустріч хвилі, мали вищі значення висоти відбитих хвиль, ніж на палях, де ребро паль було направлено назустріч хвилі, в усьому діапазоні зміни значень крутизни прийдешньої хвилі. Різниця між висотами відбитих хвиль для досліджених форм паль була вищою для проникного хвилелому проникністю 20%. Різниця між висотами відбитих хвиль та висотою прийдешньої хвилі збільшувалася зі збільшенням крутизни хвилі та зменшенням проникності пального хвилелому.

5. Установлено, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від крутизни прийдешньої хвилі спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які складалися з паль квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі. Найменші значення відношення між висотами відбитої та проникної хвилі мали місце для квадратних паль, в яких сторона квадрату була направлена назустріч хвилі, та для однорядного проникного хвилелому проникністю 20%.

6. Показано, що найвищі відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від нормованого хвильового числа реєструвалися для хвилеломів проникністю 20%, які складалися з паль квадратного поперечного перерізу, де сторона квадрату була направлена назустріч прийдешній хвилі. Найменші відношення між висотами відбитої хвилі та проникної хвилі в залежності від хвильового числа спостерігалися для хвилеломів проникністю 50%, які складалися з паль квадратного поперечного перерізу, де ребро палі було спрямоване назустріч хвилі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Alturfi, U. A. & Shukur, A. H. K. (2024). Investigation of energy dissipation for different breakwater based on computational fluid dynamic model. *CFD Lett.*, 16(1), 22–42. <https://doi.org/10.37934/cfdl.16.1.2242>
2. Hoagland, S. W., Jeffries C.R., Irish J.L., et al. (2023). Advances in morphodynamic modeling of coastal barriers: A review. *J. Waterway Port Coast. Ocean Eng.*, 149(5), 03123001. <https://doi.org/10.1061/JWPED5.WWENG-1825>
3. Voskoboinick, V., Khomitsky, V., Voskoboinyk, O., Tereshchenko, L., & Voskoboinick, A. (2021). Wave loads on protective dam of the Marine channel of the Danube-Black sea. *Hydro-environment Research*, 35(3), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.003>
4. Voskoboinick, V., Onyshchenko, A., Voskoboinyk, O., Makarenkova, A., & Voskobiinyk, A. (2022). Junction flow about cylindrical group on rigid flat surface. *Heliyon*, e12595-1-12. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12595>
5. Li, Z., Wang, Z., Liang, B., & Wang, X. (2024). Experimental study on hydrodynamic performance and structural forces of curved and vertical front face pile-supported permeable breakwaters. *Phys. Fluids*, 36(11), 117134. <https://doi.org/10.1063/5.0237833>
6. Huang, J., Lowe, R.J., Ghisalberti, M., & Hansen, J.E. (2024). Wave transformation across impermeable and porous artificial reefs. *Coast. Eng.*, 189, 104488. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104488>
7. Voskoboinick, A., Voskoboinick, V., Turick, V., Voskoboinyk, O., Cherny, D., & Tereshchenko, L. (2021). Interaction of group of bridge piers on scour. In Z. Hu, S. Petoukhov, I. Dychka, M. He (Eds.), *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1247. Springer, 3-17. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1
8. Neelamani, S. & Al-Anjari, N. (2021). Experimental investigations on wave induced dynamic pressures over slotted vertical barriers in random wave fields. *Ocean Eng.*, 220, 108482. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108482>
9. Li, Z., Liang, B., Wang, Z., Pan, X., & Shi, L. (2025). An experimental study on the hydrodynamic performance of pile-supported caisson-type breakwaters with inclined porous plates under regular waves. *Phys. Fluids*, 37(4), 047115 <https://doi.org/10.1063/5.0260788>
10. Hu, Y. (2025). Wave dissipation performance of breakwater. *E3S Web of Conferences*, 606, 05005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560605005>
11. George, A. & Cho, I. H. (2020). Hydrodynamic performance of a vertical slotted breakwater. *Intern. J. Naval Architect. and Ocean Eng.*, 12, 468-478. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2019.12.001>

12. Somervell, L., Thampi, S., & Shashikala A. P. (2018) Estimation of friction coefficient for double walled permeable vertical breakwater. *Ocean Eng.*, 156, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.050>
13. Francis, V., Rudman, M., Ramakrishnan, B., Loh, S., & Valizadeh, A. (2023) Solitary wave interaction with upright thin porous barriers. *Ocean Eng.*, 268, 113394. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113394>
14. Hussein, K. B., Ibrahim, M., Awaad, A. S., & Abd El Ghany, S. H. (2024). Hydrodynamic performance of half pipe breakwaters experimentally and numerically. *Transact. Maritime Sci.*, 13(2), TOMS. <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n02.002>
15. Voskoboinick, V. A., Turick, V. N., Voskoboinyk, O. A., Voskoboinick, A. V., & Tereshchenko I. A. (2019). Influence of the deep spherical dimple on the pressure field under the turbulent boundary layer. In: Hu, Z., Petoukhov, S., Dychka, I., & He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 754. Springer, Cham., 23-32. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_3
16. Voskoboinick, V., Kornev, N., & Turnov, J. (2013). Study of near wall coherent flow structures on dimpled surfaces using unsteady pressure measurements. *Flow Turbulence Combust.*, 90(4), 709-722. <https://doi.org/10.1007/s10494-012-9433-9>
17. Voskoboinick, V. A., Voskoboinick, A. A., Turick, V. N., & Voskoboinick, A. V. (2020). Space and time characteristics of the velocity and pressure fields of the fluid flow inside a hemispherical dimple generator of vortices. *J. Eng. Physics and Thermophysics*, 93(5), 1205-1220. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02223-3>
18. Voskoboinick, V. A., Gorban, I. M., Voskoboinick, A. A., Tereshchenko, L. N., & Voskoboinick, A. V. (2021). Junction flow around cylinder group on flat plate. In V. A. Sadovnichiy, M. Z. Zgurovsky (Eds.), *Contemporary Approaches and Methods in Fundamental Mathematics and Mechanics. Understanding Complex Systems*. Springer, 35-50. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3
19. Onyshchenko, A., Kovalchuk, V., Voskoboinick, V., Voskobiinyk, A., Aksonov, S., Trudenko, D., & Hrevtsov S. (2024). Establishing patterns of change in the coefficients of reflection, transmission and dissipation of wave energy depending on parameters of a permeable vertical wall. *Eastern-European J. Enterprise Technologies.*, 4/5(130), 46-56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061-2024.309969>
20. Vinogradnyi, G. P., Voskoboinick, V. A., Grinchenko, V. T., & Makarenkov, A. P. (1989). Spectral and correlation characteristics of the turbulent boundary layer on an extended flexible cylinder. *J. Fluid Dyn.*, 24(5), 695-700. <https://doi.org/10.1007/BF01051721>

Стаття надійшла до редакції 29.01.2026, надійшла після рецензування 13.03.2026, прийнята 31.03.2026

The article was received 29.01.2026, received after revision 13.03.2026, accepted 31.03.2026

Воскобійник Володимир Анатолійович

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України
Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2161-6923> **e-mail:** vlad.vsk@gmail.com

Лебідь Олексій Григорович

доктор технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 03186, Україна, Київ, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4003-8068> **e-mail:** o.g.lebid@gmail.com

Воскобойник Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8114-4433> **e-mail:** alexandr.vsk@gmail.com

Меренгер Юрій Петрович

аспірант відділу гідродинаміки хвильових та руслових потоків Інституту гідромеханіки НАН України

Адреса робоча: 03057, Україна, Київ, вул. Марії Капніст, 8/4

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-8595-6622> **e-mail:** YuriMer@gmail.com

Воскобойник Софія Ігорівна

студент кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки Національного університету харчових технологій

Адреса робоча: 03033, Україна, Київ, вул. Володимирська, 68

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-8829-7588> **e-mail:** ivosk3@gmail.com

УДК 678.743.22

Sergii Kozhevnikov, PhD student, specialty 183 “Technologies of environmental protection”

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3797-680X> **e-mail:** slondie7@gmail.com

Yuliia Bereznytska, Associate Professor of the Department “Technologies of environmental protection and Labor Protection Technologies”

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** bereznytska.iuo@knuba.edu.ua

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

IMPROVEMENT OF THE REGULATORY AND LEGAL FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT OF ENVIRONMENTALLY SAFE TECHNOLOGIES FOR PVC PROFILE RECYCLING: DIRECTIONS AND EXPECTED IMPACTS

Abstract. *The article examines key directions for improving the regulatory framework governing the development of environmentally safe technologies for recycling PVC profiles in Ukraine. Based on an analysis of scientific literature and EU best practices, the author proposes a Draft National Standard for secondary PVC (RePVC), which includes detailed requirements for material quality, environmental safety, and control methods. The study identifies essential technical parameters of recycled PVC, such as particle size distribution, permissible levels of impurities and toxic residues, mechanical properties, and ecological indicators. A structured model of a normative act is presented, covering procedures for acceptance, labelling, transportation, conformity assessment, and material traceability. Special attention is devoted to analyzing necessary amendments to the Laws of Ukraine “On Waste Management,” “On Waste,” and the Tax Code. These changes include the introduction of mandatory disposal of PVC products, the implementation of Extended Producer Responsibility (EPR), and the establishment of economic incentives for recyclers, such as tax benefits, investment credits, and accelerated depreciation of recycling equipment. The article also provides a quantitative assessment of expected economic and environmental effects: a threefold increase in RePVC output, a reduction in CO₂ emissions by more than 7,000 tons per year, significant savings on landfilling, and yearly raw material savings exceeding EUR 3 million. The proposed measures create favorable conditions for developing a circular economy, improving resource efficiency, and harmonizing Ukrainian regulations with EU standards. The results can be used for drafting national standards, designing state support programs for recycling enterprises, and developing EPR mechanisms in the field of PVC waste management.*

Keywords: *PVC profiles, polymer recycling, secondary PVC (RePVC), national standard, waste management, extended producer responsibility (EPR), circular economy, environmental safety.*

С.В. Кожевніков, Ю.О. Березницька

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

УДОСКОНАЛЕННЯ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЇ БАЗИ РОЗВИТКУ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ ПВХ-ПРОФІЛІВ: НАПРЯМИ ТА ОЧІКУВАНІ ЕФЕКТИ

Анотація. У статті досліджено напрями удосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів в Україні. Метою статті є наукове обґрунтування та розроблення комплексних пропозицій щодо вдосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів, включаючи створення національного стандарту на вторинний ПВХ (RePVC), удосконалення законодавства та формування економічних стимулів для переробної галузі. На основі аналізу наукових джерел і практик ЄС запропоновано проєкт національного стандарту на вторинний ПВХ (RePVC) із детальними вимогами до якості, екологічної безпечності та методів контролю. У роботі визначено ключові технічні параметри вторинного ПВХ – гранулометричні характеристики, допустимі рівні токсичних залишків, механічні властивості та екологічні ліміти. Сформовано структуру нормативного акту, що охоплює правила приймання, маркування, транспортування, оцінки відповідності та простежуваності матеріалу. Окрему увагу приділено аналізу змін до Закону України «Про управління відходами», «Про відходи» та Податкового кодексу, які спрямовані на впровадження обов'язкової утилізації ПВХ-виробів, розширеної відповідальності виробника (РВВ) та стимулювання переробників через пільги, податковий кредит і прискорену амортизацію обладнання. У статті проведено кількісну оцінку економічних та екологічних ефектів від запровадження стандарту та супутніх регуляторних змін: збільшення обсягів RePVC у 3 рази, скорочення викидів CO₂ більш ніж на 7000 т/рік, зменшення витрат на захоронення відходів та економію понад 3 млн євро на рік. Запропонований комплекс заходів формує передумови для розвитку циркулярної економіки, підвищує ресурсну ефективність та сприяє гармонізації українського законодавства з європейськими нормами. Результати дослідження можуть бути використані при розробленні національних стандартів, державних програм підтримки переробних підприємств та механізмів РВВ у сфері поводження з ПВХ-виробами.

Ключові слова: ПВХ-профілі, переробка полімерів, вторинний ПВХ (RePVC), національний стандарт, утилізація, розширена відповідальність виробника, циркулярна економіка, екологічна безпека.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.31-42>

Вступ

Проблема поводження з ПВХ-відходами в Україні набуває дедалі більшої гостроти, оскільки галузь виробництва ПВХ-профілів стрімко зростає, а обсяги демонтованих конструкцій збільшуються щорічно. Відсутність єдиних стандартів якості вторинного ПВХ, недостатня розвиненість інфраструктури переробки та застарілі положення законодавства призводять до значних втрат матеріального потенціалу та надмірного екологічного

навантаження. З огляду на європейський курс України та вимоги циркулярної економіки, питання гармонізації стандартів, створення системи простежуваності та запровадження РВВ стає ключовою умовою модернізації галузі. Дослідження є актуальним також у контексті підвищення енергоефективності, скорочення викидів парникових газів та зменшення залежності від імпорту первинної сировини.

Аналіз наукової літератури показав, що велика кількість вчених займається окресленим питанням. Серед них варто відмітити таких науковців, як: Крилова Г.В. [1], Лупінос А. [2], Маркіна Л.М. [3, 4], Матвєєва Н.М., Мальований Г.О. [5], Михайлова Є.О. [6], Нагурський О.А. [7, 8], Крилова Г.В. [8], Васійчук В.О. [8], Качан С.І. [8], Вихівська К.М. [8], Паладійчук Ю. [9], Плаван В. П. [10], Руда М. В. [11] та зарубіжних вчених [13-16]. Проте зазначена проблема на сьогодні остаточно не вирішена, що й окреслило мету даної статті. Метою статті є наукове обґрунтування та розроблення комплексних пропозицій щодо вдосконалення нормативно-правової бази розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів, включаючи створення національного стандарту на вторинний ПВХ (RePVC), удосконалення законодавства та формування економічних стимулів для переробної галузі.

Результати дослідження

Як вже зазначалось, удосконалення нормативно-правової бази та створення спеціальних програм розвитку екологічно безпечних технологій переробки ПВХ-профілів виступає необхідною умовою гармонізації українського законодавства [12].

Перш за все, на нашу думку, доцільно розробити Проект національного стандарту на вторинний ПВХ з чіткими вимогами до якості та безпечності.

Структура Проекту Національного стандарту на вторинний ПВХ представлена в таблиці 1.

Таблиця 1. Структура Проекту Національного стандарту на вторинний ПВХ

Елемент	Характеристика
Загальні положення:	вимоги до якості та безпечності вторинного ПВХ
Основні вимоги:	домішки $\leq 3\%$, повторне використання $\geq 70\%$, контроль токсичних залишків
Вимоги до процесу:	вуглецевий слід $\leq 2,5$ кг CO ₂ /кг, енергоспоживання $\leq 1,5$ кВт·год/кг
Контроль якості:	сертифікація та щорічний моніторинг
Маркування:	«RePVC-eco»

Джерело: запропоновано особисто.

Ниже подано макет національного стандарту у формі нормативного акту із чіткими вимогами до якості та безпечності вторинного ПВХ (RePVC) (табл. 2).

Таблиця 2. Структура Проекту Національного Стандарту України «Вторинний ПВХ (RePVC). Технічні вимоги та методи контролю»

Елемент	Зміст
Вступні положення	Сфера застосування: визначає вимоги до гранулятів і порошків RePVC, що виробляються з демонтованих виробів (віконні профілі, труби, кабельний ПВХ). Нормативні посилання: ISO 14021, ISO 50001, EN 15343 (простежуваність), EN 17059 (піролізні установки), відповідні ДСТУ/EN щодо випробувань ПВХ. Терміни та визначення: RePVC-U, RePVC-P, партія, домішки, стабілізатор, леткі речовини, паспорт партії
Вимоги до якості	Вміст ПВХ ≥ 96 мас. %, сумарні полімерні домішки ≤ 3 мас. %, неорганічні домішки ≤ 1 мас. %. Залишкова вологість $\leq 0,5$ %. Леткі речовини (VOC) $\leq 0,3$ мас. %. Вміст стабілізаторів на основі важких металів: Pb $\leq 0,05\%$, Cd $\leq 0,005\%$. Індикативна текучість розплаву (MFR) у межах, погоджених із замовником для конкретного застосування. Гранулометричний склад: 90% гранул у діапазоні 2–5 мм (для гранулятів) або d50 = 150–500 мкм (для порошків). Механічні показники контрольних зразків: σ_t , E, ударна в'язкість – не нижче 85% від аналогів із первинного ПВХ для заданої рецептури
Вимоги безпеки та екології	Вміст HCl у газових викидах при термообробці – відповідно до лімітів місцевих норм, з обов'язковою нейтралізацією та моніторингом. Відсутність заборонених пластифікаторів (DEHP, DBP тощо) понад граничні концентрації, встановлені REACH/нац. нормами. Паспорт безпеки матеріалу (SDS) та екологічна декларація продукту (EPD) для серійних марок
Методи контролю	ІЧ-спектроскопія/DSC для ідентифікації полімерної матриці та домішок. Гравіметрія для вологи; газоаналіз для VOC. Атомно-абсорбційна/ICP-MS для важких металів. Механічні випробування зразків, реологія (MFR), гранулометрія (сита/лазерний аналіз)
Правила приймання і маркування	Партія не більше 25 т з однорідними параметрами. Паспорт партії з QR-кодом: джерело, дата, протокол випробувань, CO ₂ -фактор, рецептура. Маркування «RePVC-есо» з класом якості (A/B) та призначенням (профілі/труби/загальнопромислова переробка)
Транспортування та зберігання	Закрита тара/біг-беги; захист від зволоження та прямого сонячного випромінювання. Термін зберігання – 12 місяців за умов ≤ 25 °C і RH $\leq 65\%$
Відповідність та оцінка відповідності	Первинна сертифікація лінії та щоквартальний аудит лабораторії контролю якості. Періодичний нагляд – раз на 12 місяців, включно з відбором зразків із ринку

Крім того, на нашу думку, доцільним виступає внесення змін до Закону України «Про відходи» та «Про управління відходами» з урахуванням обов'язкової утилізації ПВХ-виробів.

Пропозиції до внесення змін у законодавство стосуються, перш за все, таких законодавчих актів:

1. Закон «Про управління відходами»: обов'язкова утилізація ПВХ.
2. Закон «Про відходи»: система РВВ, квоти на повторне використання $\geq 50\%$.
3. Податковий кодекс: пільгова ставка податку, податковий кредит.

Так, пропонується доповнити закон «Про управління відходами» статтею «Обов'язкова утилізація полівінілхлоридних виробів (ПВХ)» із такими ключовими положеннями:

Визначення переліку виробів, що підлягають обов'язковій утилізації (віконні профілі, труби, кабельні оболонки тощо).

Обов'язок виробників/імпортерів забезпечити збір і передачу на переробку не менше 80% демонтованих виробів від обсягу введення на ринок із лагом 10 років.

Вимога укласти договори з ліцензованими переробниками та звітувати в електронній системі простежуваності.

Адміністративна відповідальність за невиконання квот; можливість заміщення частини зобов'язань купівлею підтверджених «сертифікатів переробки».

Формулювання доповненого елемента представлено на рисунку 1.

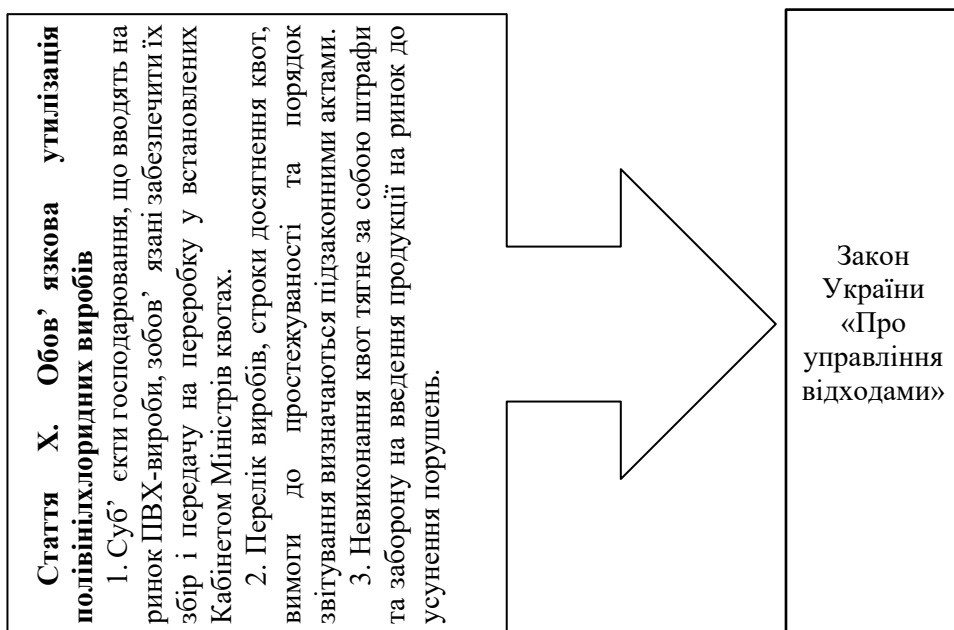


Рис. 1. Пропозиції щодо доповнення Закону України «Про управління відходами»

Крім того, доцільно внести правки в Закон України «Про відходи» в контексті визначення системи РВВ і квоти $\geq 50\%$ повторного використання.

Отже, пропонується розширена відповідальність виробника (РВВ) для ПВХ-виробів із мінімальною квотою повторного використання/переробки 50% з поетапним зростанням:

створення колективних систем РВВ для ПВХ із обов’язковою реєстрацією;
щорічні звіти про зібрані/перероблені обсяги та досягнуті показники якості;
механізм «зелених сертифікатів переробки» для підтвердження виконання зобов’язань.

Формулювання доповненого елемента представлено на рисунку 2.

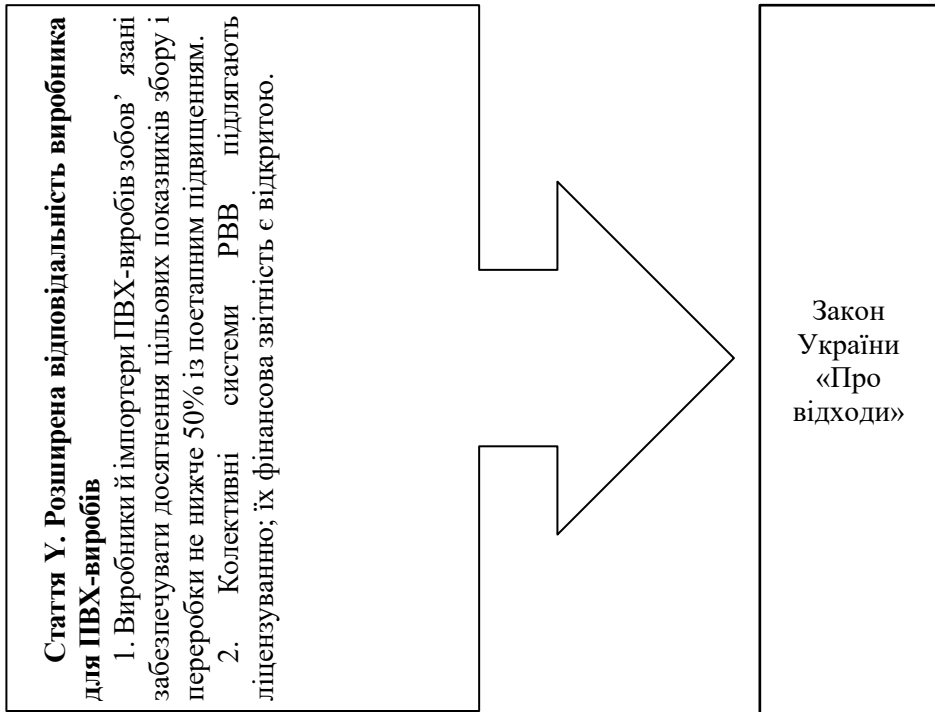


Рис. 2. Пропозиції щодо доповнення Закону України «Про відходи»

Крім того, доцільно внести правки в Податковий кодекс України в частині пільгової ставки та податкового кредиту.

На нашу думку, доречно запровадити податкові стимули для виробників та переробників, що використовують RePVC:

впровадити прискорену амортизацію обладнання для переробки ПВХ (коефіцієнт 2,5);

податковий кредит на інвестиції у ВДЕ для переробних підприємств – до 20% капітальних витрат;

запровадити зниження ставки податку на прибуток на 5 п.п. для частки прибутку, отриманого від продажу продукції з RePVC-есо.

Доцільно також реалізувати запровадження розширеної відповідальності виробника (РВВ) для компаній, що випускають ПВХ-вікна та профілі. Це стимулюватиме виробників брати участь у переробці.

Важливим напрямом також виступає надання податкових пільг і державних грантів підприємствам, що впроваджують екологічно безпечні технології.

Оцінювання ефектів законодавчих змін і податкових стимулів для переробки ПВХ доцільно здійснювати в рамках балансової моделі «потік відходів → вихід вторинної сировини → економічні вигоди → податкові ефекти», де ключовими змінними виступають потужність інфраструктури переробки, різниця цін між первинним та вторинним ПВХ, вуглецевий ефект заміщення, а також параметри податкових преференцій.

У базовій постановці сукупна пропускна здатність мережі пілотних хабів визначається як сума їхніх номінальних потужностей:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

За умови впровадження трьох регіональних хабів з однаковою паспортною потужністю $Q_i = 15\,000$ т/рік маємо $Q_{\Sigma} = 3 \cdot 15\,000 = 45\,000$ т/рік. Саме ця величина формує «верхню межу» переробки у сценарії функціонування мережі хабів, що відображає перехід від одиничного пілоту до інституційно підтриманої інфраструктури (через РВВ, гранти, податкові стимули), отже, розрахунки мають інтерпретуватися як річний ефект при досягненні проєктного завантаження.

Економічний ефект від заміщення первинного ПВХ вторинним (RePVC) коректно моделювати як зменшення витрат на сировину на одиницю продукції, помножене на обсяг заміщення:

$$E_{\text{raw}} = Q_{\Sigma} \cdot \Delta P,$$

де, $\Delta P = P_{\text{prim}} - P_{\text{sec}}$ – цінова «премія первинності», що відображає, наскільки дорожче обходиться первинний полімер порівняно з вторинним матеріалом еквівалентної функціональної придатності. За прийнятим припущенням $\Delta P = 800$ євро/т річна економія витрат на сировину становить $E_{\text{raw}} = 45\,000 \cdot 800 = 36\,000\,000$ євро/рік. Важливо, що цей ефект є прямим (cash-effect) і не залежить від ставки дисконту в однорічному горизонті; однак у багаторічній оцінці його доцільно приводити до теперішньої вартості через:

$$\text{NPV} = \sum_{t=1}^T \frac{E_{\text{raw}, t}}{(1+r)^t}.$$

Екологічний ефект у вуглецевому вимірі доцільно рахувати за методом заміщення (substitution approach), коли кожна тонна вторинного ПВХ вважається такою, що «витісняє» виробництво певної кількості первинного ПВХ, а відтак зменшує пов'язані з ним викиди. Тоді скорочення викидів CO_2 за рік визначається як:

$$E_{\text{CO}_2} = Q_{\Sigma} \cdot \Delta c,$$

Δc – питомий ефект скорочення (т $\text{CO}_2/\text{т}$), який узагальнює різницю вуглецевих інтенсивностей ланцюга «первинне виробництво» та «переробка/рециклінг». За прийнятою консервативною оцінкою $\Delta c = 2 \text{ т } \text{CO}_2/\text{т}$ отримуємо:

$$E_{\text{CO}_2} = 45\,000 \cdot 2 = 90\,000 \text{ т } \text{CO}_2/\text{рік}.$$

Методологічно це є чистим річним ефектом, який, за наявності ціни на вуглець P_{CO_2} , може бути монетизований як $V_{\text{CO}_2} = E_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{CO}_2}$.

У нашому випадку монетизація вуглецю не закладена, натомість фіксується фізичний результат із фокусом на екологічній результативності.

Податковий ефект від прискореної амортизації обладнання слід трактувати як зміну оподаткованого прибутку через збільшення амортизаційних відрахувань у поточному періоді. Загальна логіка тут така: якщо річна амортизація за стандартним режимом дорівнює A_0 , а за прискореним режимом – A_1 , то додаткова амортизація $\Delta A = A_1 - A_0$ зменшує податкову базу на ΔA , а економія податку становить:

$$E_{\text{tax,dep}} = \Delta A \cdot \tau,$$

де τ – ставка податку на прибуток.

У нашому сценарії закладено $A_1 = 1\,250\,000$ євро/рік і $A_0 = 500\,000$ євро/рік, отже, $\Delta A = 750\,000$ євро/рік. За ставки $\tau = 18\%$ маємо $E_{\text{tax,dep}} = 750\,000 \cdot 0.18 = 135\,000$ євро/рік.

Економічно це не «додатковий прибуток», а перерозподіл податкового тягаря у часі (tax deferral), тобто збільшення ліквідності та скорочення поточних податкових платежів, що для капіталомістких переробних ліній є критичною умовою інвестиційної привабливості на етапі запуску.

Податковий кредит на інвестиції у ВДЕ коректно описувати як одноразову знижку податкового зобов'язання або компенсацію частини капітальних витрат у розмірі κ від інвестицій I_{RES} :

$$E_{\text{tax,RES}} = \kappa \cdot I_{\text{RES}}.$$

За прийнятою конструкцією $\kappa = 20\%$ і $I_{\text{RES}} = 1\,000\,000$ євро одержуємо $E_{\text{tax,RES}} = 0.20 \cdot 1\,000\,000 = 200\,000$ євро (одноразово). Для наукової інтерпретації важливо підкреслити, що цей механізм зменшує ефективну вартість капіталу (WACC) для переробного підприємства, адже знижує потребу у зовнішньому фінансуванні інвестицій, а отже, опосередковано впливає і на конкурентоспроможність RePVC.

Ефект від зниження ставки податку на прибуток для частки прибутку, отриманого від продажу продукції з RePVC-есо, доцільно формалізувати як різницю ефективних ставок на маржинальний прибуток «еко-сегмента»:

$$E_{\text{tax,eco}} = \Pi_{\text{eco}} \cdot (\tau_0 - \tau_1).$$

Якщо прибуток від RePVC-есо оцінено як $\Pi_{\text{eco}} = 2\,000\,000$ євро/рік, а ставка знижується з $\tau_0 = 18\%$ до $\tau_1 = 13\%$ (зменшення на 5 п.п.), тоді $E_{\text{tax,eco}} = 2\,000\,000 \cdot (0.18 - 0.13) = 100\,000$ євро/рік. Таким чином, сумарний економіко-

фіскальний ефект для суб'єктів ринку складається з (i) прямої сировинної економії, (ii) фізичного екологічного результату у CO₂-еквіваленті, (iii) податкових механізмів, що підвищують ліквідність і рентабельність інвестицій у переробку; саме така «триконтурна» конструкція є найбільш придатною для обґрунтування доцільності РВВ, грантів і податкових стимулів як взаємодоповнюваних інструментів.

Таблиця 3. Розрахункова деталізація показників

Показник	Позначення	Формула	Підстановка	Результат
Сукупна потужність хабів	Q_{Σ}	$3 \cdot 15\,000$	$3 \cdot 15\,000$	45 000 т/рік
Економія на сировині	E_{raw}	$Q_{\Sigma} \cdot 800$	$45\,000 \cdot 800$	36 000 000 €/рік
Скорочення CO ₂	E_{CO_2}	$Q_{\Sigma} \cdot 2$	$45\,000 \cdot 2$	90 000 т/рік
Економія податку (аморт.)	$E_{\text{tax,dep}}$	$(A1 - A0) \tau$	$(1\,250\,000 - 500\,000) \cdot 0.18$	135 000 €/рік
Кредит ВДЕ	$E_{\text{tax,RES}}$	κI_{RES}	$0.20 \cdot 1\,000\,0000$	200 000 € (1 раз)
Економія податку (RePVC-eco)	$E_{\text{tax,eco}}$	$\text{Песо}(\tau_0 - \tau_1)$	$2\,000\,000(0.18 - 0.13)$	100 000 €/рік

Оцінка економічних та екологічних ефектів змін у законодавстві й податкових стимулів представлена в таблиці 4.

Таблиця 4. Оцінка економічних та екологічних ефектів змін у законодавстві й податкових стимулів

Показник	Формула / припущення	Результат
Сукупна потужність пілотних хабів	$3 \cdot 15\,000$ т/рік	45 000 т/рік
Економія на сировині завдяки заміщенню первинного ПВХ	$45\,000 \cdot 800$ євро/т	36 000 000 євро/рік
Скорочення викидів CO ₂	$45\,000 \cdot 2$ т CO ₂ /т	90 000 т CO ₂ /рік
Економія податку завдяки прискореній амортизації обладнання	$(1\,250\,000 - 500\,000) \cdot 18\%$	135 000 євро/рік
Податковий кредит на інвестиції у ВДЕ	$1\,000\,000 \cdot 20\%$	200 000 євро (одноразово)
Зменшення податкового навантаження на прибуток від RePVC-eco	$2\,000\,000 \cdot (18\% - 13\%)$	100 000 євро/рік

Джерело: розраховано автором на основі припущень щодо параметрів пілотних хабів та податкових преференцій.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У статті доведено, що запровадження єдиного національного стандарту на RePVC та оновлення законодавчої бази створюють значний екологічний, економічний та технологічний ефект. Розроблений проект стандарту забезпечує підвищення якості вторинної сировини, прозорість її походження і контроль екологічних параметрів. Запропоновані зміни до законів «Про відходи» та «Про управління відходами» формують дієвий механізм РВВ, що стимулює виробників до участі в переробці ПВХ-виробів. Саме це й складає наукову новизну даного дослідження. Оцінка ефектів демонструє зростання обсягів RePVC у кілька разів, скорочення CO₂ та суттєву економію коштів. Отже, реалізація запропонованих заходів сприятиме формуванню сучасної інфраструктури переробки та наближенню України до стандартів ЄС.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на: розробку методик оцінювання повного життєвого циклу виробів з ПВХ; моделювання економічної ефективності впровадження РВВ для різних сегментів ринку; вивчення можливостей створення регіональних хабів глибокої переробки полімерних відходів; оцінку впливу нових стандартів на інвестиційну привабливість галузі; адаптацію українських технічних вимог до директив ЄС щодо циркулярної економіки та поводження з відходами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крилова, Г. В. (2022). *Екобезпечна утилізація побутових пластикових відходів в технологіях із завершальним біорозкладом* (Дисертація доктора філософії, Національний університет «Львівська політехніка»). <https://lpnu.ua/sites/default/files/2023/radaphd/22210/disertaciya-krilova-gv.pdf>
2. Луїніос, А., & Нуржій, Н. (2018). Аналіз тенденцій розвитку підприємницької діяльності у сфері утилізації полімерних відходів в Україні. *Менеджмент і підприємництво: тенденції розвитку*, (2, № 04), 55–63. <https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>
3. Маркіна, Л. М., & Крива, М. С. (2018). Вивчення технологічних параметрів піролізу відпрацьованих шин при статичному навантаженні. *Наука та інновації*, 14(6), 35–49. <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>
4. Маркіна, Л. М., Ушкац, С. Ю., & Жолобенко, Н. Ю. (2021). Визначення небезпеки пластикових відходів для дослідження можливості їх утилізації термічними методами. *Проблеми охорони праці в Україні*, 37(2), 25–37. <https://doi.org/10.36804/nndipbor.37-2.2021.25-37>
5. Матвєєва, Н. М., & Мальований, Г. О. (2024). Особливості розвитку підприємств з переробки відходів та вторинної сировини. *Економіка та суспільство*, (60).
6. Михайлова, Є. О., Дейнека, Д. М., & Панчева, Г. М. (2021). Аналіз методів перероблення пластикових відходів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, (1(7)), 80–89.
7. Нагурський, О. А., Крилова, Г. В., Васійчук, В. О., & Качан, С. І. (2021). Утилізація полімерних побутових відходів в технологіях із завершальним біорозкладом. У *Проблеми сталого розвитку: матеріали міжнародної науково-практичної конференції* (с. 194–195).
8. Нагурський, О. А., Крилова, Г. В., Васійчук, В. О., Качан, С. І., & Вихівська, К. М. (2022). Екологічна ефективність утилізації пластикових відходів у технологіях виробництва капсульованих добрив. У *Сталий розвиток – стан та перспективи: матеріали III Міжнародного наукового симпозиуму* (с. 95–96).

9. Паладійчук, Ю., & Телятнюк, І. (2021). Обґрунтування способів переробки полімерних відходів сільськогосподарського виробництва. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, (4(115)), 97–108. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4-11>
10. Плавач, В. П., Савченко, Б. М., & Денисюк, В. В. (2020). Переробка полімерних відходів: сучасний стан та перспективи розвитку. Отримано з <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2021/paper/viewFile/13658/11491>
11. Руда, М. В., Яремчук, Т. С., & Бортнікова, М. Г. (2021). Циркулярна економіка в Україні: адаптація європейського досвіду. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*, 3(1), 212–222. <https://doi.org/10.23939/smeu2021.01.212>
12. Савчук, А. П., & Сова, Н. В. (2024). Переробка полівінілхлориду в умовах циклічної економіки. *Технології та інжиніринг*, (3(20)), 127–141.
13. Arora, N., et al. (2023). Assessment of carbon emission potential of polyvinyl chloride plastics: A case study.
14. Chanda, M. (2021). Chemical aspects of polymer recycling. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 133–150.
15. Dimitris, S., & Achilias, D. S. (2014). Recent advances in the chemical recycling of polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). *Materials Recycling: Trends and Perspectives*, 3, 64.
16. Fredi, G., & Dorigato, A. (2021). Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 159–177.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2026, надійшла після рецензування 02.02.2026, прийнята 10.03.2026

REFERENCES

1. Krylova, H. V. (2022). *Ekobezpechna utylizatsiia pobutovykh plastykovykh vidkhodiv v tekhnolohiiakh iz zavershalnym biorozkladom* [Environmentally safe utilization of household plastic waste in technologies with final biodegradation] (PhD dissertation, Lviv Polytechnic National University) [in Ukrainian]. <https://lpnu.ua/sites/default/files/2023/radaphd/22210/disertaciya-krilova-gv.pdf>
2. Lupinos, A., & Nurzhii, N. (2018). *Analiz tendentsii rozvytku pidpriemnytskoi diialnosti u sferi utylizatsii polimernykh vidkhodiv v Ukraini* [Analysis of trends in the development of entrepreneurial activity in the field of polymer waste utilization in Ukraine]. *Management and Entrepreneurship: Development Trends*, (2, No. 04), 55–63 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.26661/2522-1566-2018-2/04-06>
3. Markina, L. M., & Kryva, M. S. (2018). *Vyvchennia tekhnolohichnykh parametriv pirolizu vidpratsovanykh shyn pry statychnomu navantazhenni* [Study of technological parameters of waste tire pyrolysis under static load]. *Science and Innovation*, 14(6), 35–49 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/scin14.06.038>
4. Markina, L. M., Ushkats, S. Yu., & Zholobenko, N. Yu. (2021). *Vyznachennia nebezpeky plastykovykh vidkhodiv dlia doslidzhennia mozhlyvosti yikh utylizatsii termichnymi metodamy* [Assessment of plastic waste hazards for studying the possibility of their utilization by thermal methods]. *Problems of Occupational Safety in Ukraine*, 37(2), 25–37 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36804/nndipbop.37-2.2021.25-37>
5. Matvieieva, N. M., & Malovanyi, H. O. (2024). *Osoblyvosti rozvytku pidpriemstv z pererobky vidkhodiv ta vtorynnoi syrovyny* [Features of the development of waste and secondary raw materials processing enterprises]. *Economy and Society*, (60) [in Ukrainian].
6. Mykhailova, Ye. O., Deineka, D. M., & Pancheva, H. M. (2021). *Analiz metodiv pereroblennia plastykovykh vidkhodiv* [Analysis of methods for plastic waste processing]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies*, (1(7)), 80–89 [in Ukrainian].

7. Nahurskyi, O. A., Krylova, H. V., Vasiichuk, V. O., & Kachan, S. I. (2021). *Utylizatsiia polimernykh pobutovykh vidkhodiv v tekhnolohiiakh iz zavershalnym biorozkladom* [Utilization of polymer household waste in technologies with final biodegradation]. In *Problems of Sustainable Development: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (pp. 194–195) [in Ukrainian].
8. Nahurskyi, O. A., Krylova, H. V., Vasiichuk, V. O., Kachan, S. I., & Vykhivska, K. M. (2022). *Ekolohichna efektyvnist utylizatsii plastykovykh vidkhodiv u tekhnolohiiakh vyrobnytstva kapsulovanykh dobryv* [Environmental efficiency of plastic waste utilization in technologies for the production of encapsulated fertilizers]. In *Sustainable Development – State and Prospects: Proceedings of the III International Scientific Symposium* (pp. 95–96) [in Ukrainian].
9. Paladiichuk, Yu., & Teliatnyuk, I. (2021). *Obgruntuvannia sposobiv pererobky polimernykh vidkhodiv silskohospodarskoho vyrobnytstva* [Substantiation of methods for processing polymer waste from agricultural production]. *Engineering, Energy, Transport in Agro-Industrial Complex*, (4(115)), 97–108 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2021-4-11>
10. Plavan, V. P., Savchenko, B. M., & Denysiuk, V. V. (2020). *Pererobka polimernykh vidkhodiv: suchasnyi stan ta perspektyvy rozvytku* [Processing of polymer waste: Current state and development prospects]. Retrieved from <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2021/paper/viewFile/13658/11491> [in Ukrainian].
11. Ruda, M. V., Yaremchuk, T. S., & Bortnikova, M. H. (2021). *Tsyrukuliarna ekonomika v Ukraini: adaptatsiia yevropeiskoho dosvidu* [Circular economy in Ukraine: Adaptation of European experience]. *Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Problems of Development*, 3(1), 212–222 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.23939/smeu2021.01.212>
12. Savchuk, A. P., & Sova, N. V. (2024). *Pererobka polivinilkhloridu v umovakh tsyklichnoi ekonomiky* [Polyvinyl chloride recycling in a circular economy]. *Technologies and Engineering*, (3(20)), 127–141 [in Ukrainian].
13. Arora, N., et al. (2023). Assessment of carbon emission potential of polyvinyl chloride plastics: A case study.
14. Chanda, M. (2021). Chemical aspects of polymer recycling. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 133–150.
15. Dimitris, S., & Achilias, D. S. (2014). Recent advances in the chemical recycling of polymers (PP, PS, LDPE, HDPE, PVC, PC, Nylon, PMMA). *Materials Recycling: Trends and Perspectives*, 3, 64.
16. Fredi, G., & Dorigato, A. (2021). Recycling of bioplastic waste: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 4, 159–177.

The article was received 02.01.2026, received after revision 02.02.2026, accepted 10.03.2026

Кожевников Сергей Викторович

аспірант, спеціальність 183 «Технології охорони навколишнього середовища», Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Проспект Повітряних сил України, 31, м. Київ, 03037, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-3797-680X> **e-mail:** slondie7@gmail.com

Березницька Юлія Олегівна

доцент кафедри «Технології захисту навколишнього середовища та охорони праці», Київський національний університет будівництва і архітектури

Адреса робоча: Проспект Повітряних сил України, 31, м. Київ, 03037, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** bereznytska.iuo@knuba.edu.ua

УДК 629.735:331.45

Tetyana Kozlovskaya, Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524> **e-mail:** kozlovskaya5819@gmail.com

Volodymyr Golovenskiy, Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2320-0895> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Volodymyr Tiahnii, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9801> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Oleg Kyrychenko, Lecturer of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4445-4057> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Andriy Tsarenko, Senior Lecturer of the Department of Aviation Transport

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-8382> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Kremenchuk Flight College of Kharkiv National University of Internal Affairs, Kremenchuk, Ukraine

FACTORS OF ENVIRONMENTAL CONDITION NORMALIZATION DURING AIRCRAFT OPERATION

Abstract. *A comprehensive analysis of environmental factors shaping the impact of aviation activity on the environment has been carried out, including emissions of harmful substances, acoustic pollution, and thermal and vibrational effects. The operational characteristics of aircraft determining the scale of CO₂, NO_x, SO_x, CO, and particulate matter emissions at different flight phases have been systematically examined. The dependence of emission intensity on engine type, combustion parameters, and flight altitude – which influence photochemical processes in the tropopause – has been evaluated. A comparative analysis of the environmental characteristics of turbojet, turbofan, hybrid, and electric aircraft engines revealed a trend toward reduced specific fuel consumption and pollutant levels due to increased thermodynamic cycle efficiency. The nature of acoustic loads generated by engines, landing gear, and aerodynamic body elements has been studied, identifying zones of the greatest impact near airports. International standards on aircraft noise exposure and noise reduction methods have been analyzed, establishing correlations between propulsion system design parameters and noise emission levels. This enables optimization of turbine blade and nozzle architecture to minimize sound pressure levels. Secondary factors of environmental impact have been separately considered, including pollution caused by fuel and lubricants, de-icing agents, maintenance byproducts, and the formation of contrails and induced cirrus clouds that alter the atmospheric radiation balance. Monitoring data confirming spatial nonuniformity of pollution around airports and along flight corridors have been analyzed. Technological directions for minimizing harmful emissions have been summarized, particularly the implementation of low-temperature combustion technologies, and the advantages of hybrid-electric propulsion systems have been identified, achieving CO₂ emission reductions of 30–50%. The effectiveness of digital modeling of combustion chamber processes for predicting environmental performance at the design stage has been demonstrated.*

A conceptual model of ecological monitoring for aircraft operation has been developed, integrating Big Data analytics, Internet of Things (IoT), and digital twin technologies for real-time control of emissions, noise, and fuel consumption. The integration of monitoring results into airport environmental management systems has been proposed, following a concept that includes energy-efficient infrastructure, renewable energy utilization, and waste recycling. The necessity of applying economic incentives for aviation enterprises – such as environmental certificates, tax benefits, and support for innovative projects – has been substantiated. Special attention is paid to personnel training, environmental awareness, and institutional cooperation between aviation and environmental protection authorities.

Keywords: aircraft, environmental impact, engine emissions, noise exposure, sustainable aviation fuel, digital monitoring, decarbonization.

**Т.Ф. Козловська, В.В. Головенський, В.Г. Тягній,
О.П. Кириченко, А.О. Царенко**

Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ, м. Кременчук, Україна

ЧИННИКИ НОРМАЛІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ДОВКІЛЛЯ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН

Анотація. Проведено комплексний аналіз екологічних чинників, що формують вплив авіаційної діяльності на довкілля, зокрема викидів шкідливих речовин, акустичного забруднення, теплових і вібраційних ефектів. Системно розглянуто особливості експлуатації повітряних суден, які визначають масштаби викидів CO_2 , NO_x , SO_x , CO та твердих частинок у різних режимах польоту. Оцінено залежність інтенсивності викидів від типу силової установки, параметрів згоряння та висоти польоту, що впливають на перебіг фотохімічних процесів у тропосфері. Проведено порівняльний аналіз екологічних характеристик турбореактивних, турбовентиляторних, гібридних та електричних авіадвигунів, який виявив тенденцію до зниження питомого споживання палива та рівня забруднень за рахунок підвищення ефективності термодинамічного циклу. Досліджено природу акустичного навантаження, що створюється авіадвигунами, шасі та аеродинамічними елементами корпусу, із визначенням зон найбільшого впливу поблизу аеропортів. Проаналізовано міжнародні стандарти щодо шумового впливу і методи зниження шуму, встановлено взаємозв'язок між конструктивними параметрами силових установок і рівнем шумового випромінювання, що дозволяє оптимізувати архітектуру лопаток турбіни та сопел для мінімізації звукового тиску. Окремо розглянуто вторинні фактори негативного впливу на довкілля, серед яких забруднення паливно-мастильними матеріалами, реагентами, продуктами технічного обслуговування, а також формування конденсаційних слідів і хмар, що змінюють радіаційний баланс атмосфери. Проаналізовано результати моніторингових досліджень, які підтверджують просторову нерівномірність забруднень у районах аеропортів та на висотних трасах польотів. Узагальнено технологічні напрями мінімізації шкідливих викидів, зокрема впровадження низькотемпературного згоряння, визначено переваги використання гібридно-електричних схем, що забезпечують зниження викидів CO_2 до 30–50%. Показано ефективність цифрового моделювання робочих процесів у камерах згоряння для прогнозування екологічних характеристик ще на етапі проєктування. Розроблено концептуальну модель екологічного моніторингу

експлуатації повітряних суден, що поєднує технології BigData, IoT та цифрових двійників для контролю викидів, шуму та витрат палива в реальному часі. Запропоновано інтеграцію результатів моніторингу у систему екологічного управління аеропортів за концепцією, яка включає енергоефективну інфраструктуру, використання відновлюваних джерел енергії та утилізацію відходів. Обґрунтовано необхідність застосування економічних стимулів для підприємств авіаційної галузі, таких як екологічні сертифікати, податкові пільги та підтримка інноваційних проєктів. Особливу увагу приділено ролі кадрової підготовки, екологічної культури персоналу та інституційної взаємодії між авіаційними й природоохоронними структурами.

Ключові слова: повітряні судна, екологічний вплив, викиди авіадвигунів, шумове навантаження, сталє авіаційне паливо, цифровий моніторинг, декарбонізація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.43-59>

Вступ

Авіаційна галузь, як один із ключових секторів глобальної транспортної системи, залишається значним джерелом антропогенного впливу на навколишнє середовище [1-3]. Зростання інтенсивності повітряних перевезень, розширення флоту цивільної авіації та впровадження нових форм енергетичного забезпечення створюють складний комплекс екологічних викликів, що охоплюють викиди парникових газів, шумове забруднення, утворення конденсаційних слідів і внесення змін у мікроклімат навколо аеропортів [1, 4-6]. Сучасні підходи до експлуатації повітряних суден потребують не лише підвищення паливної ефективності та надійності, а й інтеграції принципів сталого розвитку у всі етапи життєвого циклу від проєктування до утилізації складників авіаційних конструкцій [5, 7-9]. У цьому контексті особливої ваги набуває дослідження чинників, що визначають можливості нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден, яке є **актуальним** у світлі глобальної декарбонізації авіаційної індустрії та переходу до концепції “зеленого неба” (GreenSky, GS).

Аналіз сучасних наукових досліджень у сфері екологічної безпеки авіації [1-9] засвідчує стрімке зростання інтересу до вивчення комплексного впливу експлуатації повітряних суден на довкілля, що охоплює як хімічні, так і фізичні чинники. Значна частина робіт присвячена кількісній оцінці викидів шкідливих речовин, зокрема CO₂, NO_x, SO_x, часток сажі та летких сполук [4-6, 10], які утворюються на різних етапах циклу польоту (Landing/Take-Off, LTO). У наукових публікаціях активно досліджують методи математичного моделювання процесів згоряння в камерах авіадвигунів, що дають змогу прогнозувати динаміку формування продуктів викидів і їхній вплив на верхні шари атмосфери [11-13]. Одночасно з цим досліджуються механізми утворення авіаційного шуму та його просторове поширення [14-16], а також розробляються критерії оцінки акустичного навантаження згідно з вимогами стандартів «ICAO Annex-16» і програм «CAEP» [17, 18]. Також значну увагу приділено впливу експлуатаційних факторів на стан ґрунтів і водних об’єктів поблизу аеропортів, насамперед забрудненню паливно-мастильними матеріалами, реагентами для обробки злітно-посадкових смуг і стоками

технічного обслуговування [19-21]. Останніми роками формується тенденція до впровадження комплексних систем екологічного моніторингу, що поєднують супутникові спостереження, сенсорні мережі IoT та аналітику великих даних для оцінки кумулятивного ефекту авіаційної діяльності на регіональному рівні. Водночас більшість наявних робіт мають фрагментарний характер і зосереджені на ізольованих аспектах проблеми без урахування їхньої взаємодії у спільній екосистемі авіаційного транспорту. **Невирішеною залишається проблема** побудови комплексної методології оцінювання та нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден, яка б інтегрувала технічні, організаційні й цифрові чинники в єдину систему управління екологічними ризиками та забезпечення сталого розвитку авіації.

Таким чином, **метою роботи** є розроблення комплексної методології оцінювання та нормалізації екологічного стану довкілля при експлуатації повітряних суден, яка інтегрує технічні, технологічні, організаційні та цифрові чинники впливу авіаційної діяльності на навколишнє середовище. Концепція дослідження базується на поєднанні моделей викидів шкідливих речовин, акустичного навантаження, енергоспоживання та життєвого циклу авіаційних систем (LifeCycleAssessment, LCA) із сучасними засобами цифрового моніторингу, аналітики великих даних (BigData, BD) та цифрових двійників польотних процесів. Передбачається, що запропонований підхід забезпечить можливість кількісного прогнозування екологічних наслідків експлуатації на основі інтеграції даних про реальні режими польоту, параметри авіадвигунів і стан навколишнього середовища. Особливу увагу при цьому має бути приділено створенню інструментарію для впровадження політики сталого розвитку в авіаційній галузі, що дозволить перейти від локального контролю забруднень до динамічного управління екологічними ризиками у масштабі життєвого циклу повітряних суден і підвищити рівень екологічної безпеки авіації в цілому.

Постановка задачі визначення екологічних чинників, пов'язаних з експлуатацією повітряних суден. Забезпечення екологічної збалансованості авіаційної діяльності потребує глибокого розуміння механізмів формування основних чинників впливу на довкілля під час експлуатації повітряних суден. Одними із ключових напрямів сучасних досліджень є ідентифікація фізико-хімічних процесів, що супроводжують роботу авіадвигунів та експлуатаційно-технологічні цикли, пов'язані з польотними і наземними операціями. У структурі екологічного навантаження провідну роль відіграють газові та аерозольні викиди продуктів згоряння, рівень шуму та вібрацій, а також вторинні ефекти, спричинені взаємодією технічних систем з атмосферним і ґрунтовим середовищем. Ці фактори мають різну природу, часову тривалість та просторову масштабність, проте у сукупності вони формують інтегральний екологічний слід авіації, який потребує системного аналізу. Визначення екологічних чинників базується на урахуванні взаємозв'язку між конструктивними параметрами повітряного судна, характеристиками його силової установки, режимами польоту й умовами навколишнього середовища. Особливої уваги заслуговують процеси згоряння у камерах авіадвигунів, що визначають хімічний склад і концентрацію шкідливих викидів, а також акустичні ефекти, пов'язані з роботою компресорів, турбін та елементів обтікання. Поряд із цим актуальним є дослідження локального впливу авіаційної інфраструктури на стан повітряного, водного та ґрунтового

середовищ. Комплексний підхід до ідентифікації таких факторів створює основу для розроблення моделей оцінювання екологічного навантаження та подальшої нормалізації параметрів довкілля в умовах інтенсивної експлуатації повітряних суден.

Даний етап дослідження має бути структуровано за принципом послідовного розгляду основних груп екологічних чинників, що супроводжують експлуатацію повітряних суден, із урахуванням їхньої фізичної природи, механізмів утворення та масштабів впливу. Основні складники цього етапу охоплюють наступні категорії:

1. Аналіз викидів шкідливих речовин у процесі роботи авіадвигунів, що передбачає: визначення хімічного складу продуктів згоряння (CO_2 , NO_x , SO_x , CO , частки сажі), оцінку впливу висотних умов польоту на перебіг хімічних реакцій у тропоспазі, порівняння типів двигунів (турбореактивних, турбовентиляторних, гібридних) за екологічними параметрами, використання моделей оцінювання викидів на різних етапах польоту [10-13].

2. Дослідження акустичного забруднення та вібраційного впливу, що включає ідентифікацію основних джерел авіаційного шуму (двигуни, шасі, аеродинамічні поверхні), визначення критеріїв оцінювання шумового навантаження, аналіз екологічних зон навколо аеропортів і нормативних обмежень «ІКАО Аппех 16», розгляд методів пасивного та активного шумозниження, як-то екрани, шумопоглинальні матеріали, керування фазами [14-18].

3. Оцінювання інших факторів екологічного впливу, зокрема забруднення ґрунтів і водно-повітряного середовища поблизу аеропортів паливно-мастильними матеріалами, реагентами та відходами технічного обслуговування, вплив конденсаційних слідів і хмар індукованого типу на радіаційний баланс атмосфери, вторинні ефекти у вигляді теплових полів, мікропилу та витоків робочих рідин [19-21].

Діаграма на рис. 1 відображає логіку дослідження, спрямованого на визначення основних чинників екологічного впливу під час експлуатації повітряних суден. При цьому послідовно представлено ключові етапи аналізу, а структуризація дозволяє відобразити взаємозв'язки між фізико-хімічними, акустичними та технологічними процесами, що визначають рівень екологічного навантаження авіації, і створює аналітичну основу для подальшого моделювання процесів нормалізації стану довкілля при експлуатації повітряних суден. Сформована структура забезпечує комплексне охоплення ключових аспектів екологічного впливу авіації, дозволяючи узгодити результати фізико-хімічного, акустичного та екологічного аналізу у межах єдиної системи оцінювання стану довкілля під час експлуатації повітряних суден.

Авіадвигуни формують комплекс газових і аерозольних викидів, інтенсивність яких визначається термодинамічними параметрами згоряння (тиск/температура в камері, надлишок повітря), режимом роботи (LTO та крейсерський політ), типом двигуна й висотними умовами [10-13]. Для кількісної оцінки зручно використовувати індекси емісій (EmissionIndex, EI) та розраховувати загальний обсяг викидів за циклом:

$$E_{\text{poll}} = \sum_r \left(\text{Fuel}_r \cdot EI_{\text{poll}}^{(r)} \right), \quad (1)$$

де r – етап польоту/наземного руху, $Fuel_r$ – маса спаленого авіаційного палива. Хімічний склад викидів та механізми їхнього утворення визначаються на основі наступних категорій [1, 5, 10-13]:

- CO_2 , як базовий маркер «вуглецевого сліду» пропорційний витраті палива;
- NO_x , як складник викидів, що формується переважно за механізмом термічного NO при високій температурі та тиску у камері згоряння;
- SO_x , як складник викидів, що частково перетворюється у сульфатні аерозолі і прямо залежить від вмісту сірки в паливі;
- CO, як незгорілі вуглеводні, частка яких зростає на «холодних» режимах через неповне згоряння;
- частки сажі, що впливають на утворення контралеї та оптику атмосфери і більшою мірою характерні для збагачених та перехідних режимів.

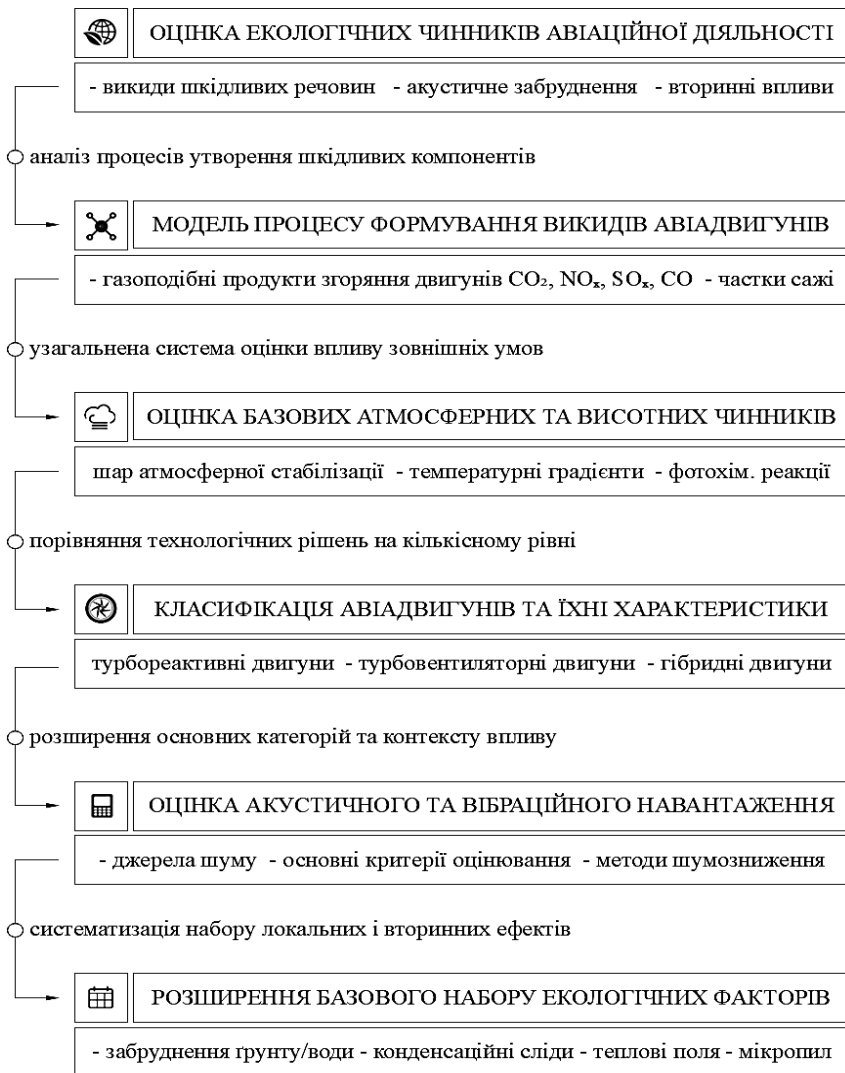


Рисунок 1. Структурна схема оцінки екологічних чинників авіаційної діяльності

У зоні тропопаузи (межовий шар між тропосферою та стратосферою) знижений тиск і температура сприяють утворенню контралей та подальших індукованих хмар; зміни вологості та радіаційного фону впливають на швидкість фотохімічних реакцій. Для оцінки висотних ефектів застосовують коригування індексів емісій з урахуванням температури, тиску та відносної вологості повітря, а також критерії утворення конденсаційних слідів.

Порівняння типів авіадвигунів надає можливість сформувати наступну класифікацію [9–12, 14–16]:

- турбореактивні авіадвигуни, що застосовуються для високошвидкісних літаків та засобів військової авіації, характеризуються вищою питомою тягою на малих габаритах, що призводить до збільшення частки NO_x і рівня шуму;
- турбовентиляторні авіадвигуни, що є сучасним стандартом цивільної авіації, характеризуються підвищеним ступенем двоконтурності, який знижує питому витрату палива та рівень шуму;
- гібридно-електричні та електричні авіадвигуни локально зменшують ЛТО-викиди та шум, але критично залежать від енергетичної щільності накопичувачів та ланцюга постачання енергії.

Порівняння типів авіадвигунів дозволяє не лише класифікувати їх за конструктивними особливостями, але й виявити тенденції зниження екологічного навантаження у процесі розвитку силових установок. Зростання ступеня двоконтурності, оптимізація паливо-повітряного співвідношення та застосування нових матеріалів у камерах згоряння сприяють зменшенню питомих викидів CO_2 і NO_x . Водночас використання гібридно-електричних схем змінює енергетичну структуру польоту, переносячи частину викидів із зони аеропорту на етапи енергогенерації, що потребує комплексного підходу до оцінки екологічного ефекту. Таким чином, еволюція авіадвигунів від турбореактивних до гібридно-електричних систем демонструє чіткий вектор переходу від локального зниження викидів до формування глобальної стратегії декарбонізації авіації, де важливу роль відіграє баланс між енергоефективністю, шумовими характеристиками та впливом на атмосферу.

Моделювання екологічного впливу авіаційної діяльності неможливе без урахування відмінностей між етапами польоту, адже умови роботи двигунів, висота, тяга та тривалість режимів суттєво впливають на кількість і склад викидів. Для цього застосовують спеціалізовані моделі оцінювання викидів за етапами польоту, які дозволяють перейти від узагальнених розрахунків до реалістичних прогнозів екологічного навантаження. Моделі оцінювання за етапами польоту [1, 5, 10–13]:

1. Наземно-повітряний цикл ЛТО охоплює режими запуску та руління, зльоту, набору висоти та заходу на посадку. Модель орієнтована на аналіз екологічного стану в зоні аеропорту й використовується для оцінювання локальних викидів у межах висот до 915 метрів.

2. Крейсерський етап польоту (Cruise-Phase, CP) враховує реальні профілі тяги, висоти та швидкості польоту. На цьому етапі головним показником є витрата палива, що визначає обсяги викидів вуглекислого газу, тоді як утворення оксидів азоту оцінюється за співвідношенням тиску та температури в камері згоряння. Для прогнозування утворення конденсаційних слідів застосовують термодинамічні критерії насичення водяної пари.

3. Інтеграція результатів із траєкторіями польоту, отриманими з бортових систем керування польотом (Flight Management System, FMS) або автоматичних

систем спостереження (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast, ADS-B), дає змогу перейти від середньостатистичних до індивідуальних (рейсових) оцінок викидів і екологічних наслідків. Це дозволяє підвищити точність аналізу та врахувати специфіку кожного рейсу, типу літака й умов експлуатації.

Застосування моделей оцінювання за етапами польоту забезпечує поетапне відтворення екологічного профілю авіаційної місії, такий підхід дозволяє кількісно оцінювати частку кожного етапу у формуванні загального вуглецевого сліду, визначати ефективність технологічних рішень та створює підґрунтя для побудови комплексних моделей сталого розвитку авіації.

Акустичне навантаження є одним із найбільш відчутних екологічних чинників, що супроводжують експлуатацію повітряних суден, особливо у зонах, прилеглих до аеропортів. Високий рівень шуму негативно впливає на якість життя населення, спричиняє психологічний та фізіологічний дискомфорт, а також порушує екологічну рівновагу у природних біоценозах. Джерела авіаційного шуму різноманітні, і для його ефективного контролю потрібен системний підхід, який охоплює конструктивні, технологічні та організаційні рішення. Основними джерелами акустичного випромінювання під час роботи повітряного судна є наступні [14-16]:

- Авіадвигуни, які формують найбільш інтенсивне акустичне навантаження внаслідок турбулентності вихлопних струменів, зсуву потоків між внутрішнім і зовнішнім контурами, а також обертання лопаток компресора й турбіни.
- Шасі, що створюють характерні аеродинамічні шуми на етапах зльоту й посадки, коли механізми посадки випущені в повітряний потік.
- Аеродинамічні поверхні (закрылки, елерони, передкрылки), які є джерелами шуму через вихрові коливання під час змін конфігурації крила.

У сукупності ці джерела формують комплексне акустичне поле, що залежить від швидкості, режиму роботи двигунів, висоти польоту, напрямку вітру та метеоумов.

Для кількісної характеристики авіаційного шуму застосовуються стандартизовані показники [16-18]:

- децибел з частотною корекцією відображає рівень шуму з урахуванням чутливості людського слуху до різних частот;
- показник сприйманого рівня шуму (Perceived Noise Level, PNL) оцінює психоакустичне сприйняття шуму, інтегруючи частотні й часові параметри;
- ефективний сприйманий рівень шуму (Effective Perceived Noise Level, EPNL) враховує не лише інтенсивність, а й тривалість звукового впливу, що робить його базовим критерієм у міжнародних нормах.

Оцінювання шумового навантаження здійснюється з використанням вимірювальних станцій, розташованих у контрольних точках навколо аеропортів, що дозволяє побудувати акустичні карти зон впливу та визначити допустимі межі експлуатації. Зниження рівня авіаційного шуму досягається за допомогою комплексу технічних і технологічних заходів [11, 14-17]:

1. Пасивні методи:

- використання шумопоглинальних матеріалів у каналах двигуна, на обшивці повітряного судна та елементах шасі;
- застосування аеродинамічних екранів і зміни профілю лопаток для зменшення турбулентності потоку;
- оптимізація режимів зльоту та посадки (зменшення потужності двигунів, плавні траєкторії).

2. Активні методи:

- фазове керування акустичними хвилями, при якому генеруються протифазні сигнали для нейтралізації шуму;
- регулювання подачі палива та повітря з метою мінімізації пульсацій у камері згоряння;
- використання цифрових систем керування тягою (Full Authority Digital Engine Control, FADEC), що дозволяють адаптивно знижувати рівень шуму в режимі реального часу.

Проблематика акустичного забруднення безпосередньо пов'язана з рівнем технологічного розвитку авіаційної техніки. Поступовий перехід від турбореактивних до високодвоконтурних і гібридних двигунів, удосконалення аеродинаміки та впровадження систем активного шумозниження зумовлюють зменшення акустичного впливу в середньому на 20-25 % за останні два десятиліття. Проте локальні перевищення нормативів навколо великих аеропортів і над густонаселеними територіями залишаються суттєвою проблемою. Тому актуальним напрямом є інтеграція акустичних моделей у системи екологічного моніторингу, що дозволить не лише контролювати рівень шуму, а й прогнозувати його поширення в реальному часі з урахуванням погодних і траєкторних факторів.

Окрім газових викидів та шумового навантаження, авіаційна діяльність супроводжується низкою вторинних екологічних ефектів, які мають локальний або глобальний характер. Їхній вплив часто залишається поза межами прямих вимірювань, проте вони формують значну частку загального екологічного сліду авіації. До таких факторів належать забруднення ґрунтів і водно-повітряного середовища у зонах аеропортів, утворення конденсаційних слідів та індукованих хмар, а також теплові поля, мікропил і витоки технологічних рідин. Їх дослідження є необхідним для формування комплексної екологічної моделі функціонування авіаційної інфраструктури.

Зони аеропортів характеризуються високою концентрацією джерел техногенного забруднення: паливно-мастильних матеріалів, гідравлічних рідин, антиобліднювальних реагентів, мастил, розчинників і відходів технічного обслуговування. Основні механізми потрапляння забруднювачів у довкілля включають у себе наступні категорії [19-21]:

- розливи та випаровування палива під час заправки літаків;
- стік рідких реагентів з оброблених поверхонь під час танення снігу;
- просочування відпрацьованих мастил у ґрунт через дренажні системи;
- накопичення відходів технічного обслуговування і ремонту.

Ці процеси зумовлюють локальне підвищення концентрацій нафтопродуктів, гліколів та важких металів у ґрунтах і поверхневих водах. У довгостроковій перспективі вони впливають на структуру мікробіоценозів, окисно-відновний потенціал ґрунту та якість підземних вод. Ефективна протидія забрудненню вимагає системи очищення стоків, герметизації паливних складів і впровадження програм екологічного моніторингу навколо аеропортів.

На висотах 8-12 км, у зоні тропопаузи, вихлопні гази авіадвигунів містять водяну пару, частки сажі та іонізовані домішки, які слугують ядрами конденсації. Це сприяє утворенню конденсаційних слідів, що за певних умов перетворюються на індуковані перисті хмари. Їхній вплив формалізується через введення у математичну модель наступних факторів [1, 2, 5]:

- зменшення альbedo поверхні Землі за рахунок відбиття сонячної радіації;
- підвищення утримання довгохвильового випромінювання в атмосфері, що створює ефект додаткового потепління;
- збільшення оптичної товщини атмосфери і змінах локального радіаційного балансу.

Згідно з сучасними кліматичними моделями, індуковані хмари можуть мати порівнянний або навіть більший вплив на баланс енергії, ніж прямі викиди CO₂. Це свідчить про необхідність урахування контралеїв як непрямого чинника глобального потепління під час оцінювання екологічного ефекту авіації. Зменшення цього впливу можливе за рахунок оптимізації маршрутів і висот польоту залежно від температури й вологості у верхніх шарах тропосфери.

Серед додаткових впливів у рамках дослідження пропонується виділити наступні категорії [6, 19, 21]:

1. Теплові поля, що формуються внаслідок роботи двигунів, систем кондиціонування та допоміжних енергетичних установок (Auxiliary Power Unit, APU). Вони локально змінюють температурний режим навколо аеропортів і можуть впливати на розвиток турбулентності.

2. Мікропил утворюється під час зносу шин, гальмівних колодок, бетонних покриттів злітно-посадкових смуг. Мікрочастинки містять важкі метали (Cu, Zn, Pb), які можуть потрапляти у повітря та водне середовище.

3. Витоки технологічних рідин (гідравлічних, охолоджувальних, мастильних) становлять небезпеку через токсичність і тривалу біодеградацію.

Хоча зазначені фактори мають локальний характер, вони визначають якість середовища в безпосередній зоні експлуатації повітряних суден і можуть кумулятивно впливати на стан екосистем. Зазначені фактори впливу, що супроводжують авіаційну діяльність, мають комплексний і мультифакторний характер. Вони поєднують локальні забруднення наземних екосистем із глобальними атмосферними ефектами, які впливають на кліматичні процеси. Аналіз цих чинників свідчить, що традиційні методи контролю авіаційних викидів є недостатніми, якщо не враховувати непрямі впливи, пов'язані з утворенням індукованих хмар, теплових полів і мікропили. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення інтегрованих моделей екологічного впливу, які об'єднують наземні та висотні процеси, забезпечуючи більш повну оцінку екологічної безпеки авіаційної інфраструктури.

Теоретичні основи досліджень

Технологічні та організаційні підходи до нормалізації екологічного стану. Поглиблення екологічної трансформації авіаційної галузі вимагає переходу від констатації масштабів впливу до активного управління екологічними процесами на всіх етапах життєвого циклу повітряних суден. У сучасних умовах стрімкого зростання повітряного трафіку та посилення міжнародних кліматичних зобов'язань критично важливо формувати не лише аналітичні моделі оцінювання впливів, а й практичні технологічні та організаційні рішення, здатні знизити рівень шкідливих викидів, шумового навантаження й ресурсного споживання. Глобальна ініціатива переходу до вуглецево-нейтральної авіації вимагає комплексного підходу, який поєднає

інженерні інновації, цифрові системи моніторингу, нормативні механізми регулювання та формування екологічної культури персоналу. Саме тому розроблення технологічних і організаційних підходів до нормалізації екологічного стану є одним із найактуальніших напрямів розвитку сучасної авіаційної науки і практики, що визначає траєкторію сталого функціонування повітряного транспорту.

Даний етап дослідження структуровано за напрямками, які відображають взаємозв'язок між технічними, цифровими та управлінсько-нормативними засобами забезпечення екологічної стійкості авіаційної діяльності. Послідовність дослідження базується на переході від технічних рішень і технологічних інновацій до систем моніторингу, аналітики та організаційного впровадження заходів сталого розвитку [6-12, 17, 18].

1. Технічні рішення для зменшення шкідливих викидів – передбачають дослідження й впровадження технологій, спрямованих на скорочення газових і твердих викидів авіадвигунів. Основну увагу зосереджено на застосуванні систем низькотемпературного згоряння, що знижують утворення оксидів азоту; переході на альтернативні види палива, зокрема стійкі авіаційні палива (Sustainable Aviation Fuels, SAF), водень і синтетичні вуглеводні; оптимізації аеродинамічних характеристик і зменшенні маси конструкції, що знижує питомі витрати палива; інтеграції гібридно-електричних і повністю електричних силових установок, які мінімізують локальні викиди в зоні аеропортів.

2. Системи екологічного моніторингу та управління впливами – формують аналітичне підґрунтя для оцінки реального екологічного ефекту застосованих технологій. До основних напрямів віднесено: створення систем екологічного моніторингу польотів (Flight Environmental Impact Monitoring; FEIA), що забезпечують контроль за рівнем викидів і шуму в режимі реального часу; використання моделей життєвого циклу для кількісної оцінки «вуглецевого сліду» повітряних суден; впровадження концепції «Зелений аеропорт» (Green Airport), орієнтованої на енергоефективну інфраструктуру, замкнений обіг відходів та використання відновлюваних джерел енергії; розвиток цифрових платформ обліку та прогнозування викидів, що базуються на аналітиці великих даних та цифрових двійниках.

3. Організаційно-нормативні механізми визначають рамкові умови реалізації екологічних ініціатив у галузі авіації. Вони включають: узгодження з міжнародними стандартами, які регламентують рівень допустимих викидів і шуму; участь у національних програмах декарбонізації авіації та розвитку «зеленої логістики»; використання економічних стимулів, таких як екологічні збори, сертифікати на скорочення викидів і державні субсидії для інноваційних технологій; підвищення рівня екологічної культури та професійної підготовки персоналу як передумови ефективної реалізації екологічної політики підприємств авіаційного транспорту.

Запропонована структура забезпечує цілісність підходу до нормалізації екологічного стану, поєднуючи інженерні рішення, цифрову аналітику та організаційно-економічні механізми в єдину систему екологічного управління авіаційною галуззю. Рис. 2 ілюструє взаємозв'язок між технічними, цифровими та нормативними напрямками забезпечення екологічної стійкості авіаційної діяльності. Схема демонструє, що ефективна нормалізація стану довкілля можлива лише за умови поєднання інженерних інновацій,

спрямованих на зменшення викидів, із системами моніторингу та аналітики, які забезпечують контроль екологічних параметрів у режимі реального часу. У подальшому ці процеси узгоджуються через організаційно-нормативні механізми, що формують єдиний регуляторний і управлінський контур. Таким чином, наведена на рис. 2 схема відображає послідовність переходу від технологічних рішень до цифрової екологічної інтеграції та управління впливами, що є основою сучасної моделі сталого розвитку авіаційної галузі.

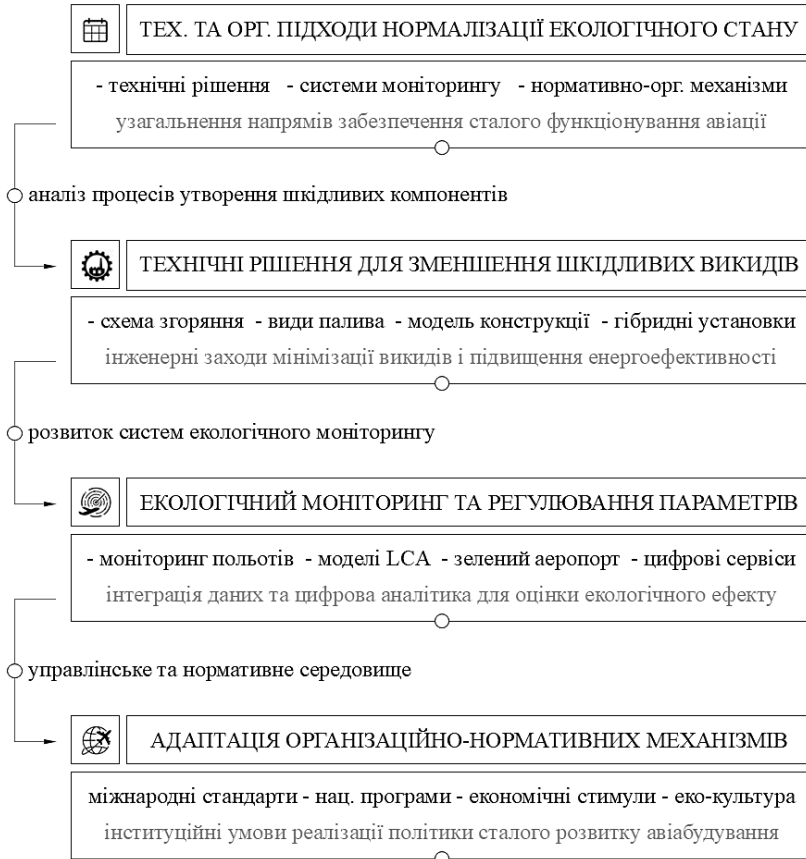


Рисунок 2. Структурна схема технологічних та організаційних підходів до нормалізації екологічного стану авіабудування

Сучасна авіаційна галузь перебуває на етапі переходу від традиційних підходів до зниження викидів до комплексних технологічних стратегій екологічної оптимізації силових установок. Ключовим напрямом є впровадження систем низькотемпературного згоряння, як-то технологій типу «Lean-Burn» та «Rich-Quench-Lean», які забезпечують істотне скорочення утворення оксидів азоту за рахунок зменшення пікових температур у камері згоряння та контролю співвідношення паливо-повітря.

Значного розвитку набули дослідження щодо альтернативних видів палива, зокрема стійких авіаційних палив (Sustainable Aviation Fuels, SAF), синтетичних вуглеводнів і водню [9-12]. Такі енергетичні носії дають змогу скоротити «вуглецевий слід» на 50-80 % у межах життєвого циклу палива,

а надалі досягти майже нульових викидів CO₂. Розроблення адаптованих паливних систем і камер згоряння для водневих двигунів формує нову технологічну парадигму “Zero-EmissionPropulsion”, що визначає стратегічний напрям декарбонізації авіації. Не менш важливим є підвищення аеродинамічної досконалості та зниження маси конструкції, що безпосередньо зменшує питомі витрати палива. Використання композиційних і градієнтних матеріалів, оптимізація геометрії крила, інтеграція адаптивних поверхонь керування забезпечують зменшення опору руху та підвищення енергоефективності. Наступним етапом технологічної еволюції стає інтеграція гібридно-електричних і повністю електричних силових установок, здатних мінімізувати локальні викиди та шум у зоні аеропортів. Поєднання електричних приводів з газотурбінними системами створює передумови для гнучкого енергетичного балансу, зниження пікових навантажень і розширення можливостей енергоменеджменту польоту. Узагальнюючи, зазначені технічні рішення становлять інноваційний комплекс заходів, спрямований на формування авіаційної енергетики нового покоління, де скорочення викидів досягається не за допомогою ізольованих технічних удосконалень, а через інтеграцію термодинамічної, конструктивної та електроенергетичної оптимізації.

Ефективне управління екологічним станом авіаційної діяльності базується на переході від періодичного контролю до безперервного моніторингу екологічних параметрів у реальному часі. Центральне місце у цьому процесі посідають системи екологічного моніторингу польотів (Flight Environmental Impact Monitoring, FEIM), які забезпечують збір, аналіз і візуалізацію даних щодо викидів, шуму, витрати палива та маршруту польоту [6-8]. Інтеграція таких систем у бортові комплекси управління дає змогу оперативно оцінювати вплив польотних операцій на довкілля, формувати адаптивні профілі тяги й оптимізувати траєкторії для мінімізації шкідливих ефектів. Важливим складником сучасної аналітичної екосистеми є моделі життєвого циклу, що дозволяють оцінювати «вуглецевий слід» авіаційних технологій з урахуванням усіх етапів. Такий підхід забезпечує можливість виявлення «критичних точок» впливу та прийняття рішень щодо підвищення екологічної ефективності на системному рівні. Впровадження концепції «Зелений аеропорт» (Green Airport) є ключовим напрямом нормалізації стану довкілля на наземному етапі експлуатації. Вона передбачає створення енергоефективної інфраструктури, замкнених циклів водо- та відходообігу, а також активне використання відновлюваних джерел енергії для живлення аеропортових систем. Таким чином, формується інтегрована модель екологічно орієнтованої аеронавігаційної інфраструктури, здатна суттєво скоротити не лише прямі, а й опосередковані викиди. Особливу роль у розвитку сучасних підходів до моніторингу відіграють цифрові платформи обліку та прогнозування екологічних параметрів [6–8], що поєднують аналітику великих даних, мережу сенсорних пристроїв (Internet of Things, IoT) та технологію цифрових двійників. Вони дозволяють моделювати екологічні сценарії віртуально, прогнозувати наслідки експлуатаційних рішень та виявляти аномалії у системах викидів або споживання енергії. Сукупність цих рішень формує нову парадигму управління екологічними впливами в авіації, засновану на прозорості даних, предиктивному аналізі та інтеграції цифрових інструментів у процеси експлуатації. Новизна підходу полягає у створенні єдиного

інформаційного простору екологічної взаємодії, який перетворює моніторинг із контрольної процедури на активний інструмент оптимізації екологічної ефективності авіаційних систем і наземної інфраструктури.

Ефективне зниження екологічного навантаження в авіаційній галузі неможливе без формування інституційного середовища, що забезпечує узгодженість технічних рішень, нормативної бази та економічних стимулів. Центральне місце в цьому процесі займають міжнародні стандарти («ICAO CAEP», «EASA PartEco», «CORSIA»), які визначають параметри допустимих викидів, шумових рівнів і процедури обліку вуглецевого балансу. Їхня адаптація до національного законодавства створює основу для гармонізації екологічної політики на глобальному рівні та забезпечує сумісність систем моніторингу в межах єдиного авіаційного простору. Важливим складником інституційної трансформації є державні програми декарбонізації авіації та розвитку «зеленої логістики», спрямовані на інтеграцію екологічних критеріїв у транспортну стратегію. Такі програми формують умови для впровадження стійких авіаційних палив, розвитку енергетично нейтральних аеропортів та стимулюють технологічне оновлення флоту. Економічні інструменти стимулювання, зокрема екологічні збори, сертифікати на скорочення викидів і державні субсидії, відіграють роль каталізаторів технологічних інновацій. Вони переводять принцип «екологія як витрати» у площину «екологія як інвестиція», забезпечуючи конкурентоспроможність підприємств, що впроваджують стійкі рішення. Не менш суттєвим є розвиток екологічної культури та професійної підготовки персоналу, який формує когнітивну основу для впровадження екологічно орієнтованого мислення в управлінських і технічних процесах. Таким чином, організаційно-нормативні механізми утворюють метарівень екологічної трансформації авіації, у якому технічні та аналітичні інновації поєднуються з регуляторними інструментами, створюючи умови для системного переходу до вуглецево-нейтральної та ресурсно збалансованої авіаційної інфраструктури. Новизна цього підходу полягає у переході від декларативного екологічного контролю до керованої моделі сталого розвитку, що інтегрує інженерні, економічні та управлінські аспекти в єдину екосистему авіаційної політики.

Висновки

Дослідження присвячене комплексному аналізу екологічних чинників, що формують вплив експлуатації повітряних суден на довкілля, та розробленню методологічних основ нормалізації екологічного стану в умовах інтенсивного розвитку авіаційної галузі. У межах роботи системно розглянуто газові, акустичні, теплові та вторинні фактори впливу, а також визначено взаємозв'язки між параметрами авіадвигунів, режимами польоту й умовами атмосфери. Особлива увага приділена питанням декарбонізації авіаційного транспорту, оптимізації термодинамічних процесів згоряння, зниженню шумового навантаження, формуванню моделей оцінювання викидів за етапами польоту та розробленню структурних схем екологічного моніторингу. У результаті проведеного дослідження:

- виявлено закономірності формування основних видів шкідливих викидів залежно від конструктивних характеристик авіадвигунів і висотних режимів польоту;

- узагальнено підходи до моделювання акустичного впливу повітряних суден і визначено ефективність технічних засобів шумозниження;
- запропоновано технологічні рішення для зменшення екологічного навантаження, включно з використанням низькотемпературного згоряння, стійких авіаційних палив, гібридно-електричних силових установок та легких конструкцій;
- розроблено концепцію інтегрованої системи екологічного моніторингу авіаційної діяльності, що базується на поєднанні технологій великих даних, сенсорних мереж і цифрових двійників;
- обґрунтовано необхідність узгодження технічних і цифрових рішень з міжнародними екологічними стандартами та національними програмами декарбонізації;
- визначено роль економічних стимулів, кадрової підготовки та екологічної культури як чинників інституційної трансформації авіаційної галузі.

Практична значущість отриманих результатів полягає у створенні цілісної методології, що інтегрує технічні, цифрові та організаційні аспекти управління екологічними впливами повітряних суден. Запропонований підхід дозволяє здійснювати кількісне прогнозування екологічних наслідків експлуатації на основі реальних даних польотів, формувати політику сталого розвитку авіації та підвищувати рівень екологічної безпеки як у межах аеропортової інфраструктури, так і на глобальному рівні. Отримані результати можуть бути використані при розробленні програм декарбонізації, екологічних стандартів, цифрових систем моніторингу та управління викидами, що робить дане дослідження вагомим внеском у формування науково-прикладних засад «зеленої» авіації майбутнього.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Wilcox, L. J., et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
2. Burkhardt, U., & Kärcher, B. (2011). Global radiative forcing from contrail cirrus. *Nature Climate Change*, 1(1), 54–58. <https://doi.org/10.1038/nclimate1068>
3. Grewe, V., Gangoli Rao, A., Grönstedt, T., Xisto, C., Linke, F., Melkert, J., Dahlmann, K., et al. (2021). Evaluating the climate impact of aviation emission scenarios towards the Paris agreement including COVID-19 effects. *Nature Communications*, 12(1), 3841. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24091-y>
4. Rupcic, L., Pierrat, E., Saavedra-Rubio, K., Thonemann, N., Ogugua, C., & Laurent, A., et al. (2023). Environmental impacts in the civil aviation sector: Current state and guidance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119(3), 103717. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103717>
5. Singh, D. K., Sanyal, S., & Wuebbles, D. J. (2024). Understanding the role of contrails and contrail cirrus in climate change: A global perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(16), 9219–9262. <https://doi.org/10.5194/acp-24-9219-2024>
6. Gough, W. A., & Leung, A. (2022). Do airports have their own climate? *Meteorology*, 1(2), 171–182. <https://doi.org/10.3390/meteorology1020012>
7. Keiser, D., Schnoor, L. H., Pupkes, B., & Freitag, M. (2023). Life cycle assessment in aviation: A systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. *Journal of Air Transport Management*, 110, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2023.102418>

8. Mazur, K., Saleh, M., & Hornung, M. (2024). Integrating Life Cycle Assessment in conceptual aircraft design: A comparative tool analysis. *Aerospace*, 11(1), 101. <https://doi.org/10.3390/aerospace11010101>
9. Khalifa, R., Alherbawi, M., Bicer, Y., & Al-Ansari, T. (2024). Fueling circularity: A thorough review of circular practices in the aviation sector with sustainable fuel solutions. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 23, 200223. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2024.200223>
10. Wayson, R. L., Fleming, G. G., & Iovinelli, R. (2009). Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 59(1), 91–100. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.1.91>
11. Chikishev, L. M., Sharaborin, D. K., Lobasov, A. S., Dekterev, A. A., Tolstoguzov, R. V., Dulin, V. M., & Markovich, D. M. (2022). LES Simulation of a Model Gas-Turbine Lean Combustor: Impact of Coherent Flow Structures on the Temperature Field and Concentration of CO and NO. *Energies*, 15(12), 4362. <https://doi.org/10.3390/en15124362>
12. Wang, Z., Yang, Z. (2024). NOx Formation Mechanism and Emission Prediction in Turbulent Combustion: A Review. *Applied Sciences*, 14(14), 6104. <https://doi.org/10.3390/app14146104>
13. Terrenoire, E., Hauglustaine, D. A., et al. (2022). Impact of present and future aircraft NOx and aerosol emissions on atmospheric composition and associated direct radiative forcing of climate. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22, 11987–12013. <https://doi.org/10.5194/acp-22-11987-2022>
14. Edgington-Mitchell, D. M. (2019). Aeroacoustic resonance and self-excitation in screeching and impinging supersonic jets-A review. *International Journal of Aeroacoustics*, 18(2-3), 118–188. <https://doi.org/10.1177/1475472X19834521>
15. Zhao, K., Okolo, P., Neri, E., et al. (2020). Noise reduction technologies for aircraft landing gear-A bibliographic review. *Progress in Aerospace Sciences*, 112, 100589. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2019.100589>
16. Rindfleisch, T. C., Alonso, J. J., Jackson, D. C., Munguía, B. C., & Bowman, N. W. (2024). A large-scale validation study of aircraft noise modeling for airport arrivals. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 155(3), 1928–1949. <https://doi.org/10.1121/1.0025276>
17. International Civil Aviation Organization. (2017). *Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Aircraft Noise (8th ed.)*. Montreal, QC: ICAO. <https://store.icao.int/en/annex-16-environmental-protection-volume-i-aircraft-noise>
18. Rutherford, D. (2025, May). The International Civil Aviation Organization's CAEP/13 aircraft noise standards (ICCT Policy Update). *International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/05>
19. Sulej-Suchomska, A. M., Szumińska, D., de la Guardia, M., Przybyłowski, P., & Polkowska, Ż. (2024). Airport runoff water: State-of-the-art and future perspectives. *Sustainability*, 16(18), 8176. <https://doi.org/10.3390/su16188176>
20. Exton, B., Hassard, F., Medina-Vaya, A., & Grabowski, R. C. (2024). Impact of carbon sources in airport de-icing compounds on the growth of *Sphaerotilus natans*. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1320487. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1320487>
21. Olds, H. T., Corsi, S. R., & Rutter, T. D. (2022). Benzotriazole concentrations in airport runoff are reduced following changes in airport deicer formulations. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 18(1), 245–257. <https://doi.org/10.1002/ieam.4468>

Стаття надійшла до редакції 10.02.2026, надійшла після рецензування 23.03.2026, прийнята 07.04.2026

The article was received 10.02.2026, received after revision 23.03.2026, accepted 07.04.2026

Козловська Тетяна Федорівна

кандидат хімічних наук, доцент, завідувач кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Адреса робоча: вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6106-5524> **e-mail:** kozlovskaya5819@gmail.com

Головенський Володимир Васильович

кандидат технічних наук, професор кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Адреса робоча: вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2320-0895> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Тягній Володимир Григорович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Адреса робоча: вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5151-9801> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Кириченко Олег Петрович

викладач кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Адреса робоча: вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4445-4057> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

Царенко Андрій Олександрович

старший викладач кафедри авіаційного транспорту, Кременчуцький льотний коледж Харківського національного університету внутрішніх справ

Адреса робоча: вул. Перемоги 17/6, м. Кременчук Полтавської обл., 39605

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4810-8382> **e-mail:** pmm.nv.klk@gmail.com

УДК 502.573

Veronika Prykhodko, Ph.D. (Geography), Associate Professor, Associate Professor of Ecology and Environmental Protection Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693> **e-mail:** vks26@ua.fm

Odesa I.I. Mechnikov National University, Odessa, Ukraine

FEATURES OF USING THE LANDGEM MODEL TO DETERMINE METHANE EMISSIONS FROM MUNICIPAL SOLID WASTE DISPOSAL SITES

Abstract. *This article focuses on the current scientific and practical area of estimating and forecasting the production of biogas and its components, in particular methane, from municipal solid waste disposal sites. Despite a significant number of scientific studies and developed models for assessing methane generation from waste disposal sites, there are many uncertainties in the tasks of theoretical modelling and assessment of its generation. The results presented reveal the specific features of applying one of the models for calculating methane generation, the Landfill Gas Emission Model, developed by the US Environmental Protection Agency. The aim of the study is to assess the applicability of the model for estimating the generation of methane and other biogas components from landfills and waste disposal sites in Ukraine. The other methane generation models – the National Multi-Component Model based on the third-level detail decay method and the IPCC Waste Model – are also used in the study, as well as methods for the statistical analysis of results. The main results of the study consist in identifying the specific features of applying the Landfill Gas Emission Model to address the task of inventorying emissions of methane and other biogas components from Ukrainian landfills and dumps. The parameters of the calculation model that most closely approximate national conditions have been determined, namely: a methane generation constant of 0.098 year^{-1} , corresponding to conditions of rapid waste decomposition; and a content of biodegradable organic carbon at a level of 0.24 MgC/Mg of waste.*

It is necessary to take into account the landfill conditions (0.729) and the methane burn-off factor (0.8) to ensure the results as accurate as possible; however, applying these conditions does not guarantee complete consistency between results obtained using different methodologies. Thus, the total methane emissions over 50 years from the annual mass of landfilled municipal waste, calculated using the Landfill Gas Emission Model, will be 37% higher than those calculated using the National Model. Further adaptation of the model's results is promising, as is the application of the Landfill Gas Emission Model principles for determining other biogas components within the framework of the National Model. The scientific and practical significance of this study lies in the validation of the components of the Landfill Gas Emission Model for the most accurate application in Ukraine.

Keywords: *biogas, calculation model, methane generation, landfills and dumps.*

В.Ю. Приходько

Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, м. Одеса, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ LANDGEM ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ УТВОРЕННЯ МЕТАНУ ВІД МІСЦЬ ЗАХОРОНЕННЯ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Анотація. Стаття присвячена актуальному науково-практичному напрямку оцінки і прогнозу утворення біогазу та його складових, зокрема, метану, від місць захоронення твердих побутових відходів. Попри значну кількість наукових досліджень і розроблених моделей щодо оцінки утворення метану від місць захоронення відходів, в задачах теоретичного моделювання та оцінки його генерації є багато невизначеностей. Представлені результати розкривають особливості застосування однієї з моделей обчислення генерації метану *Landfill Gas Emission Model*, розробленої Американським Агентством з охорони довкілля. Метою дослідження є оцінка можливості застосування моделі для оцінки генерації метану та інших складових біогазу від полігонів і звалищ України. В роботі використані й інші моделі генерації метану – Національна багатокomпонентна модель на основі методу загасання третього рівня деталізації та *IPCC Waste Model*, а також методи статистичного аналізу результатів. Основні результати дослідження полягають у визначенні особливостей застосування *Landfill Gas Emission Model* для вирішення завдання інвентаризації викидів метану та інших складових біогазу з українських полігонів і звалищ побутових відходів. Визначені максимально наближені до національних умов параметри розрахункової моделі, а саме: константа генерації метану $0,098 \text{ рік}^{-1}$, що відповідає умовам швидкого розкладання відходів; вміст органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання на рівні $0,24 \text{ тС/т}$ відходів. Для максимально коректної адаптації отриманих результатів необхідно врахувати умови захоронення ($0,729$) та фактор вигорання метану ($0,8$), проте виконання цих умов не забезпечує повну відповідність між результатами, отриманими за різними методиками. Так, сумарна за 50 років емісія метану від річної маси захоронених побутових відходів, розрахована за *Landfill Gas Emission Model*, буде на 37% вищою, аніж за Національною моделлю. Отже, перспективним є подальша адаптація результатів моделі, а також використання принципів *Landfill Gas Emission Model* для визначення інших складових біогазу в рамках Національної моделі. Наукове та практичне значення представленого дослідження полягає в обґрунтуванні складових *Landfill Gas Emission Model* для найбільш коректного використання в Україні.

Ключові слова: біогаз, розрахункова модель, генерація метану, полігони та звалища побутових відходів.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.60-71>

Вступ

Постановка завдання. Проблема захоронення побутових відходів (ПВ) та її екологічні наслідки є однією з ключових екологічних проблем сучасного світу. Очевидно, що кількість ПВ буде зростати: так, за прогнозами (*Global Waste Management Outlook*, Statista), очікується зростання маси утворених відходів на 56-75% з 2020 по 2050 рр., пов'язане із зростанням кількості населення та

рівнем добробуту найбільш густонаселених країн світу. По-друге, основним методом управління ПВ залишатиметься захоронення: станом на 2020 р., в світі захоронювалося приблизно 69% утворених відходів, з них більше половини – стихійно. За прогнозом, така тенденція може зберегтися і до 2050 р. Третій фактор посилення «смітцевої» кризи – несталі моделі споживання та, як наслідок, значна кількість компонентів у морфологічному складі, що ускладнює сортування потоку ПВ. За даними «Звіту про стан сфери управління побутовими відходами в Україні на 2024 рік» [1], 89,94% утворених ПВ було захоронено на 5631 полігонах і сміттєзвалищах загальною площею понад 8,4 тис. га. Значна перевага захоронення над іншими методами поводження з ПВ визначає необхідність досліджень екологічних наслідків функціонування полігонів ПВ. Одним із напрямків негативного впливу на довкілля є утворення біогазу в процесі анаеробної деструкції органічної речовини. Біогаз складається, в основному, з метану (50-60%) і вуглекислого газу (30-40%), що робить його цінною енергетичною сировиною. Але ці компоненти біогазу є парниковими газами (ПГ), тому відсутність системи збору і утилізації біогазу перетворює полігони ПВ на джерела ПГ. Зазначимо, що, попри законодавчі вимоги щодо наявності системи збору і утилізації біогазу, економічно вигідно видобувати біогаз з великих полігонів ПВ, де на значних площах створюються анаеробні умови деструкції відходів. Фактично, в Україні з 2003 р. починається видобуток біогазу з полігонів ПВ, а у 2023 р. налічувалася 31 система збору біогазу, що дало змогу відновити 41,14 тис. т метану (а це приблизно 13% від загальної емісії від місць захоронення). Попри це, захоронення лишається основним джерелом ПГ (59%) в секторі «Відходи», а сам сектор «продукує» 6,4% загального викиду ПГ в Україні [2]. Тому розробка моделей оцінки емісії біогазу(метану) від місць захоронення ПВ є актуальною науково-практичною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі найбільш використовуваними в світі моделями для оцінки емісії біогазу та/або його компонентів від місць захоронення ПВ є такі:

1) модель, запропонована Міжурядовою групою експертів зі зміни клімату (МГЕЗК, IPCC) [3];

2) модель емісії біогазу (Landfill Emission Gas Model – LandGEM) [4], розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США.

В Україні оцінка емісії метану від місць захоронення ПВ проводиться за Національною багатокомпонентною моделлю на основі методу загасання першого порядку третього рівня деталізації (далі – Національна модель), яка розроблена в Інституті технічної теплофізики НАН України. Дана модель використовується в розрахунках викидів метану при складанні Національного кадастру [2].

В статті авторів [5] проведений детальний аналіз вищезначених моделей у версіях станом на 2017 рік. Огляд розрахункових моделей наведений у Керівництві [6]. Загалом зазначено, що Національна модель [3] успішно використовується для задач інвентаризації викидів, проте може бути використана й для визначених умов полігону. Зручні застосунки у вигляді електронних таблиць Excel для моделей LandGEM (різні версії) та IPCC-моделі дозволяють зручно та швидко вирішувати цільові завдання, пов'язані з інвентаризацією викидів від полігонів ПВ. Проте зазначимо, що програмне забезпечення розроблене, перш за все, для умов полігонів ПВ США,

враховуючи в параметрах моделі місцеві умови розкладання органічної речовини [4, 6]. Тим не менш, модель популярна для застосування в інших країнах. Так, в публікації [7] показано застосування моделі LandGEM для оцінки біогазового та енергетичного потенціалу, а також карбонового сліду найбільшого полігону Mohammedia-Benslimane у Марокко. В розрахунках автори спиралися на специфічні для полігону Mohammedia-Benslimane умови розкладання органічної речовини за допомогою параметрів моделі, що визначаються кліматичними характеристиками території та складом відходів. Порівняльний аналіз різних моделей розрахунку біогазу та його компонентів в умовах конкретного полігону ПВ є предметом багатьох досліджень: апробації різних моделей (IPCC, LandGEM CDM - механізм чистого розвитку) для умов полігону на півдні Бразилії присвячена стаття [8]; моделювання емісії метану з полігону ПВ Міраш (Косово) представлено у статті [9] і т.д. Загалом, автори підкреслюють відмінності в отриманих результатах розрахунків за різними моделями, надаючи перевагу національним або IPCC моделям. Оптимізації параметрів моделі LandGEM на основі верифікації моделі з використанням кліматичних даних присвячена стаття [10], автори якої наголошують про суттєву неточність параметра моделі, який визначає швидкість розкладання органічної речовини у визначених природних умовах. Інші дослідники вказують на інший суттєвий недолік LandGEM – параметри моделі (а саме константа розкладання та метановий потенціал відходів) є фіксованими протягом усього терміну експлуатації звалища [11] і пропонують модифікацію моделі за принципом поповнення «банку біогазу» з кожною наступною масою захоронених відходів.

Метою дослідження є оцінка можливості застосування нової версії моделі LandGEM 3.1 [12] для оцінки генерації метану та інших складових біогазу від полігонів і звалищ України.

Теоретичні основи визначення утворення метану з місць захоронення побутових відходів

Модель для розрахунку емісії метану та інших компонентів біогазу LandGEM, розроблена Агентством з охорони навколишнього середовища США (EPA), базується на рівнянні розкладання першого порядку для кількісного визначення викидів речовин, що утворюються внаслідок розкладання відходів на звалищах ПВ [4, 6, 12]. Ця модель широко використовується в наукових та практичних задачах, попри певну невизначеність окремих параметрів, які неможливо емпірично оцінити. В основу моделі LandGEM покладений розрахунок утворення метану від маси відходів, що були захоронені у певному році. Модель використовує коефіцієнти, які визначають утворення метану протягом наступних років. Цей принцип також застосовується для IPCC моделі (2006) та Національної моделі, в основі яких закладена кінетична модель генерації метану першого порядку. До речі, продукція біогазу відбуватиметься протягом тривалого періоду часу – за останніми оцінками, це 80 років.

Для моделей IPCC та LandGEM розроблено автоматизовані інструменти на основі електронних таблиць MS Excel, що дають змогу здійснювати розрахунки та створювати графічні матеріали.

Національна та IPCC моделі обмежені визначенням метану. А перевагою моделі LandGEM є те, що вона дозволяє оцінювати рівні викидів як біогазу, так і його складових – метану (CH_4), вуглекислого газу (CO_2), неметанових летких органічних сполук (НЛОС) та інших речовин, що надходять до атмосферного повітря від полігонів ПВ.

У січні 2025 року з'явилася нова версія LandGEM 3.1, яка вперше дає змогу провести розрахунки для визначення національних величин викидів, в той час як попередні версії, зокрема, LandGEM 3.02, розроблялися для застосування для визначених полігонів, а набір параметрів моделі враховував умови США, проте це не стало на заваді використання моделі й для інших полігонів в різних країнах світу (див. [7-9]). Тривалий час існували припущення, що попередні (до 2024 р.) Правила звітності щодо ПГ і основні параметри моделі версії LandGEM 3.02 не відображали реальну ситуацію, що спонукало до перегляду цих Правил. Основною метою оновленого модуля LandGEM 3.1 є відображення змін, що відбулися в підході, визначеному в AP-42, «Збірнику коефіцієнтів викидів забруднюючих речовин у повітря зі стаціонарних джерел» Агентства з охорони навколишнього середовища США. Методологія оцінки утворення метану на звалищах тепер посиляється на рівняння 1 з 40 CFR 98 HH (відоме як «Правила звітності щодо парникових газів») [13]. При роботі в «режимі інвентаризації викидів AP-42» нова версія LandGEM (3.1), випущена в січні 2025 року, тепер присвоює значення k і Lo на основі нових правил звітності про ПГ.

Отже, версія LandGEM 3.1 має два модуля: 1) модуль NSPS Applicability, орієнтований на полігони ПВ, що базується на нових вимогах до емісії речовин з полігонів, що містяться у Федеральному Законі «Про чисте повітря» (Clean Air Act) та у Нових стандартах роботи джерел (New Source Performance Standards – NSPS); 2) модуль Emissions Inventory з інвентаризації викидів, що базується на стандартних значеннях коефіцієнтів викидів і застосовується для інвентаризації викидів в межах штату або для окремого об'єкта, коли відсутні дані спостережень [12].

З прийняттям нових Правил звітності щодо ПГ у 2024 р., утворення метану від місць захоронення ПВ в межах певної території вперше визначається за загальноприйнятою світовою практикою на основі моделі затухання. Отже, емісія G_{CH_4} описується рівнянням [12, 13]:

$$G_{CH_4} = \left[\sum_{x=S}^{E-1} \left\{ W_x \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \cdot \frac{16}{12} (e^{-k(T-x-1)} - e^{-k(T-x)}) \right\} \right], \quad (1)$$

де x – рік, у якому відбулося захоронення відходів; S – початковий рік розрахунку; T – звітний рік, за який розраховуються викиди; W_x – кількість вологих відходів, захоронених на полігоні у році x , т; MCF – корегуючий коефіцієнт метаноутворення, що залежить від можливостей анаеробного розкладання відходів в місцях захоронення (за замовчуванням 1); DOC – вміст органічного вуглецю, здатного до біологічного розкладання, тС/т відходів; DOC_F – частка DOC , що розкладається (за замовчуванням, $DOC_F = 0,5$); F – вміст метану в біогазі (за замовчуванням, $F = 0,5$); k – коефіцієнт генерації метану (константа швидкості генерації метану), рік⁻¹.

Рівняння (1) є принципово відмінним від рівняння (2), що описує емісію метану в версії LandGEM 3.02 та у модулі NSPS Applicability версії LandGEM 3.1 [4]:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}}, \quad (2)$$

де n – період часу, за який розраховується емісія метану; k – коефіцієнт генерації метану, рік⁻¹; L_0 – потенціал утворення метану в рік i , тCH₄/тППВ; M_i – маса ТПВ, захоронених у році i , т/рік; t_{ij} – вік j -ої частини маси відходів M_i , захороненої у році i .

В рамках програми U.S. EPA's Landfill Methane Outreach Program модель LandGEM була адаптована до українських умов (Ukraine LFG Model) [6, 14] (одна з так званих LMOP's Models). Рівняння (2) для розрахунку емісії біогазу (Q_{LFG}), адаптоване для України (Ukraine LFG Model), виглядає наступним чином [14]:

$$Q_{LFG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2k L_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-k t_{ij}} \cdot MCF \cdot F, \quad (3)$$

де MCF – корегуючий коефіцієнт метаноутворення, що залежить від можливостей анаеробного розкладання відходів в місцях захоронення; F – корегуючий коефіцієнт для загорання.

Результати дослідження

Аналіз параметрів моделі, які залежать від складу відходів. Очевидно, що значення генерації метану визначаються параметрами k та L_0 , що залежать, перш за все, від категорії відходів. Так, параметр k , який також має назву «константа швидкості генерації метану», визначає швидкість розкладання відходу на полігоні та, відповідно, генерації метану. Він залежить від вмісту поживних речовин та вологи у відходах, а також від температури навколишнього середовища. На відміну від базової моделі, в українському варіанті [14] також опрацьовані значення параметра k , в залежності від кліматичних особливостей території та категорії відходів, проте розподіл значень здійснювався з прив'язкою до адміністративних районів, а не на основі кліматичного районування. Що стосується нової моделі LandGEM, то значення параметра k визначаються роком захоронення відходів (до або після 2010 року) та поділені на три категорії за умовами розкладання на полігоні в залежності від вмісту вологи. В табл. 1 наведені дані щодо константи швидкості генерації метану за різними моделями. Оскільки за моделлю LandGEM виділено 4 категорії відходів за швидкістю розкладання, то нами виконаний розрахунок відповідних значень за Національною моделлю [2] та IPCC моделлю [3], використовуючи дані про вміст основних категорій відходів з Національного Кадастру [2]. Середнє для України значення k знайдене з урахуванням зонування території країни за значеннями k для чотирьох категорій відходів, що відрізняються швидкістю розкладання [14], результат

опублікований в [5]. В другому випадку, на основі значень k з [12], обчислене середнє для України значення з урахуванням вмісту біорозкладаних відходів в загальній масі ПВ.

Оскільки однією із задач моделювання за допомогою застосунку LandGEM 3.1 є визначення емісії ПГ з певної території, то важливим є розрахунок усереднених параметрів моделі як обґрунтування вибору найбільш відповідних із запропонованого переліку.

Потенціал утворення метану L_0 характеризує максимально можливу кількість метану, що може бути згенерована з відходів, залежить від вмісту біодоступного вуглецю. Значення параметра L_0 також залежать від розрахункової моделі (табл. 2).

Табл. 1. Значення константи швидкості генерації метану k за різними моделями (визначені для умов України)

Категорія відходів	LandGEM		Національна модель	IPCC
	[5]	[12]		
Дуже швидко розкладаються (харчові відходи)	0,135	0,098	0,110	0,185
Швидко розкладаються (садово-паркові відходи)	0,068	0,067	0,070	0,1
Помірно швидко розкладаються (папір і картон, текстиль)	0,027		0,0048	0,06
Повільно розкладаються (деревина, шкіра тощо)	0,0135	0,033	0,024	0,03
Середнє для України [5]	0,0948	0,0809	0,0829	0,1127

Табл. 2. Значення потенціалу утворення метану L_0 (м³/т) за різними моделями (визначені для умов України)

Категорія відходів	LandGEM (NSPS Applicability)	Національна модель *
Дуже швидко розкладаються (харчові відходи)	69	48,8
Швидко розкладаються (садово-паркові відходи)	126	65,1
Помірно швидко розкладаються (папір і картон, текстиль)	214	118,7
Повільно розкладаються (деревина, шкіра тощо)	201	114,6
Середнє для України [5]	112,3	66,72

* перераховані з урахуванням щільності метану

Модуль Emissions Inventory LandGEM 3.1 не використовує значення потенціалу утворення метану L_0 , натомість оперує значеннями DOC , аналогічними до визначених моделлю IPCC. Модель IPCC взагалі не оперує показником потенціалу утворення метану L_0 , проте використовує схожий

показник генерації метану, що залежить від маси розкладеного біодоступного вуглецю. Обчислене за даними морфологічного складу ПВ середнє значення DOC для України склало 0,237 тС/тПВ.

Як бачимо з табл. 1 та 2, найпоширеніші моделі обчислення утворення метану при анаеробній деструкції відходів, що містять біодоступний вуглець, мають певні розбіжності у параметрах. Аналогічний принцип визначення потенціалу утворення метану L_0 в Національній моделі, однак, на відміну від LandGEM, одразу враховує фактор корекції метану MCF [2]:

$$L_{0i,j} = DOC_j \cdot DOC_F \cdot F \cdot 16/12 \cdot MCF_i. \quad (4)$$

Наприклад, якщо не враховувати цей показник, то середнє значення потенціалу за Національною моделлю склало 91,9 м³/т.

У підсумку зауважимо, що значення параметрів однієї моделі не можуть бути використані без відповідного аналізу і корекції в іншій розрахунковій моделі, проте, як показує аналіз, у випадку фіксованих значень можливо обирати найбільш оптимальний варіант з урахуванням даних інших моделей. Автори [9] відзначають, що до недоліків LandGEM відноситься те, що параметри k та L_0 мають змінюватися у часі, але в моделі є фіксованими значеннями.

Результати моделювання утворення метану від місць захоронення відходів. Для отримання результатів оцінки емісії метану та інших компонентів біогазу, який утворюється на полігонах і звалищах ПВ в Україні, нами взяті такі вихідні умови:

- 1) розрахунок виконаний від річної маси ПВ, захоронених у 2024 р. – 7796888,2918 т [1];
- 2) морфологічний склад ПВ прийнятий за даними Кадастру [2], відповідно до якого визначене середнє для маси ПВ значення $DOC = 0,237$ тС/тПВ;
- 3) значення параметрів LandGEM 3.1 прийняті максимально наближеними до визначених для національних умов (табл. 1, 2). Отримані результати скоректували з урахуванням того, що MCF для українських полігонів становить 0,729. Окрім цього, врахували коефіцієнт вигорання 0,8 для консервативної оцінки біогазового потенціалу українських полігонів відповідно до методичних рекомендацій з адаптації моделі LandGEM [14].

Для порівняльного аналізу, аналогічні розрахунки утворення метану були проведені за Національною та IPCC моделями. Для моделювання емісії метану скористалися автоматизованим інструментом на основі MS Excel (https://www.ipccn-ggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/IPCC_Waste_Model.xls) [3], а оптимізацію обчислень за Національною моделлю автором зроблено за допомогою MS Excel. Результати представлені на рис. 1.

Як бачимо, Національна та IPCC моделі дають близькі результати. Натомість результати розрахунку утворення метану за допомогою модуля Emissions Inventory LandGEM 3.1 є дещо відмінними від двох інших моделей. Так, на перший рік захоронення утворення метану за моделлю LandGEM було на 53% вище за отримане значення за Національною моделлю. Через 25 років ця різниця склала приблизно 1%. Через 40 років утворення метану,

розраховане за моделлю LandGEM, буде на 44% нижчим за отримане за Національною моделлю. Аналогічні результати отримані в роботі [5] для умов Одеської області, але для версії LandGEM 3.02. Це свідчить про певні обмеження у застосуванні модуля Emissions Inventory LandGEM 3.1 для оцінки утворення метану та інших компонентів біогазу з полігонів і звалищ України, а також про необхідність детального аналізу і розробки корегуючих коефіцієнтів для кращої інтерпретації результатів. Аналіз кореляційного зв'язку між отриманими значеннями утворення метану за Національною моделлю та Emissions Inventory LandGEM 3.1 на рівні 0,89 дозволяє зробити висновок про наявність тісного зв'язку між отриманими значеннями генерації метану.

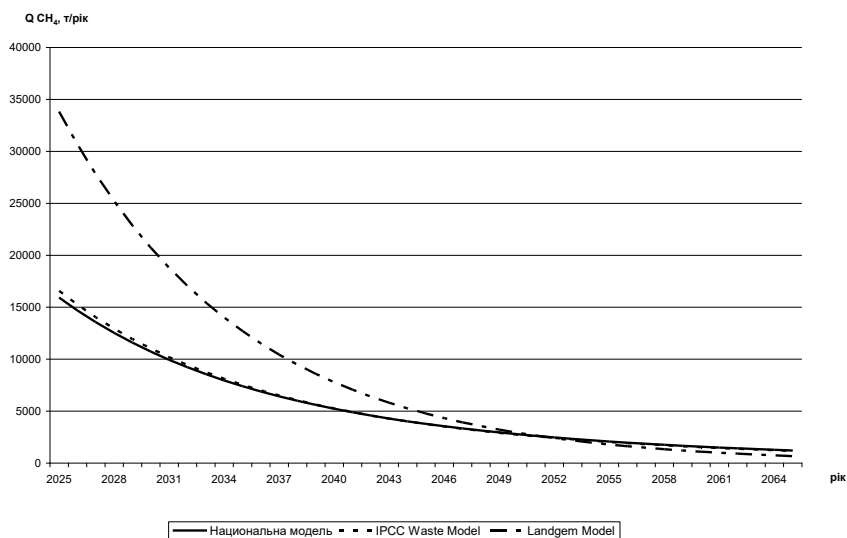


Рис. 1. Результати розрахунку утворення метану (на 40 років) від річної маси ПВ, утворених і захоронених у 2024 р. на полігонах і звалищах України, за різними моделями

В табл. 3 наведені результати розрахунку загального утворення метану від маси ПВ, що була захоронена на полігонах і звалищах України у 2024 р., за трьома моделями – Національною, IPCC та LandGEM 3.1.

Табл. 3. Маса метану (т), що утвориться від маси ПВ, захоронених на полігонах і звалищах України у 2024 р. (7796888,2918 т), протягом 50 років

Національна модель	IPCC модель	LandGEM 3.1
225859,5	228728	359828,8
В тому числі за перші 8 років, % до загальної маси		
43	44	55

Серед факторів, що впливають на відмінність результатів розрахунків утворення метану за моделлю LandGEM 3.1, можна назвати відсутність врахування морфологічного складу відходів та відповідних кожній категорії значень k та DOC . Американська модель передбачає можливість обрати єдині значення для всієї маси захоронених ПВ, проте це значно впливає на

результат (рис. 2). Як видно з рис. 2, вибір параметрів для сукупної маси відходів (без врахування морфологічного складу) суттєво змінює результати. Так, наприклад, залежність (1) описує утворення метану від річної маси ПВ з вибором найбільш близьких до визначених для українських умов середніх значень k та DOC . Крива (2) розрахована для умов повільного розкладання та вмісту біодеградабельного вуглецю для змішаних відходів. Крива (3) ілюструє утворення метану за умов швидкого розкладання змішаної маси ПВ, тобто на основі вибору показників без врахування отриманих осереднених для українських умов значень k та DOC (Національна та IPCC моделі).

Серед переваг модуля Emissions Inventory LandGEM 3.1 є можливість розрахувати не тільки утворення метану, а й біогазу та його складових – двоокису вуглецю та 48 забруднюючих речовин та НЛОС. При застосуванні модуля можливо додати інші речовини або скоректувати концентрації [12]. Наприклад, розрахуємо утворення НЛОС, діхлордиформетану та тетрахлоретилену (рис. 3). Так, у 2025 р. маса ПВ, захоронена у попередньому році, зproduкує 240,8 т НЛОС, 9,8 т діхлордиформетану та 3,1 т тетрахлоретилену. Можливість автоматизації розрахунків інших компонентів біогазу є перевагою моделі LandGEM, що є, на нашу думку, необхідним елементом удосконалення Національної моделі.

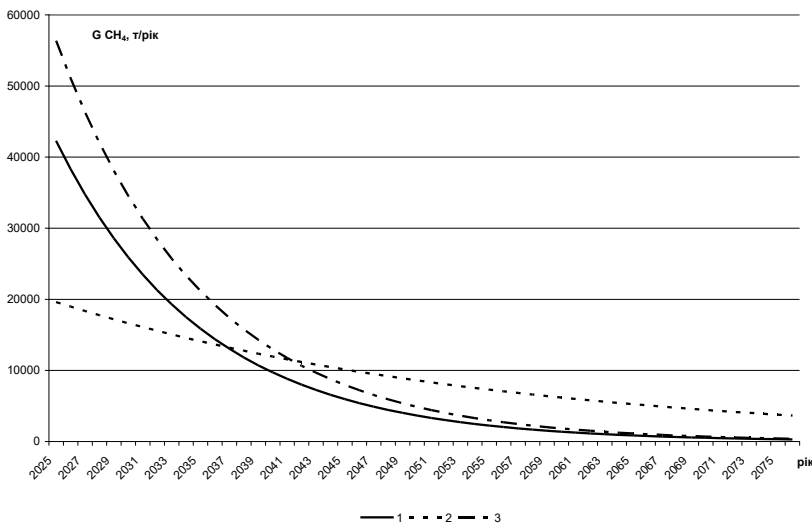


Рис. 2. Результати визначення утворення метану від річної маси захоронених у 2024 р. ПВ на полігонах і звалищах України з урахуванням різних параметрів моделі:

1 – $k = 0,098 \text{ рік}^{-1}$ та $DOC = 0,24 \text{ тС/тПВ}$ (найбільш наближені до умов України);
 2 – $k = 0,033 \text{ рік}^{-1}$ та $DOC = 0,32 \text{ тС/тПВ}$ (результати розрахунку наближені до отриманих за іншими моделями);
 3 – $k = 0,098 \text{ рік}^{-1}$ та $DOC = 0,32 \text{ тС/тПВ}$ (обрані за описом як найбільш характерні для українських умов)

Висновки та перспективи подальших досліджень

Модель LandGEM версії 3.1 вперше дозволяє реалізувати розрахунки утворення біогазу та його компонентів для сукупності місць захоронення відходів в межах певної території, що реалізовано у вигляді автоматизованого інструменту на основі електронних таблиць Excel – модуль Emissions

Inventory. Серед переваг модуля – можливість розрахунку метану та двоокису вуглецю, а також 48 інших речовин. Проте, як показало дослідження, застосування даного модуля до українських полігонів має певні обмеження. Попри спільну основу для розрахунку емісії метану – рівняння розкладання органічної речовини першого порядку – модель LandGEM дає більш високі результати емісії метану у порівнянні з Національною та IPCC моделями. В основному, це пов'язане з відсутністю врахування морфологічного складу захоронених відходів та, відповідно, швидкості розкладання і вмісту органічного вуглецю в окремих фракціях.

Наукова новизна представленого дослідження полягає в апробації нової версії моделі LandGEM з метою визначення емісії метану та інших складових біогазу від полігонів та звалищ ПВ України. Наукове та практичне значення представленого дослідження полягає в обґрунтуванні складових моделі для найбільш коректного використання в Україні. Попри виявлені недоліки, перевагою є можливість визначення інших складових біогазу, що може розглядатися як перспективний напрямок удосконалення Національної моделі. З іншого боку, модель LandGEM потребує розробки певних коефіцієнтів, що дозволили б максимально адаптувати її для використання в інших країнах.

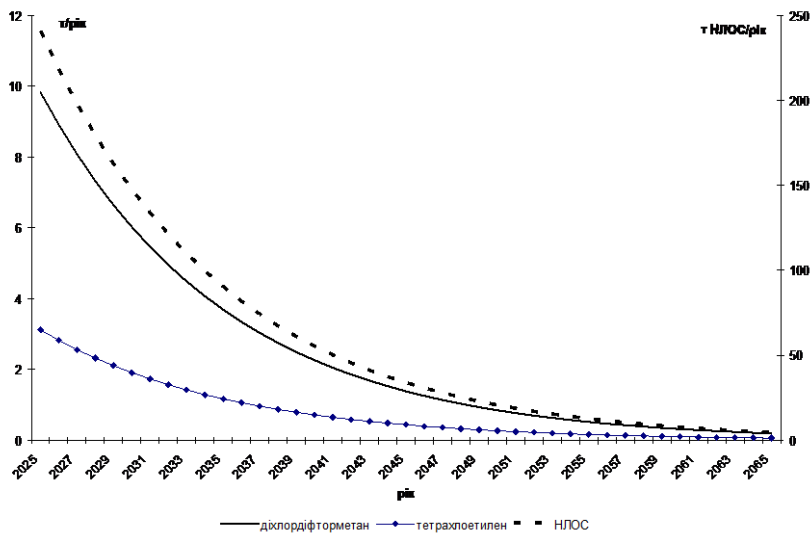


Рис. 3. Динаміка утворення інших складових біогазу від річної маси захоронених у 2024 р. ПВ на полігонах і звалищах України

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Ministry for Communities, Territories and Infrastructure Development of Ukraine. (2024). *Report on the state of municipal solid waste management in Ukraine in 2024* [Звіт про стан сфери управління побутовими відходами в Україні за 2024 рік]. <https://mindev.gov.ua/diialnist/napiamy/sfera-komunalnykh-posluzh/upravlinnia-pobutovymy-vidkhodamy>
2. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (2025). *Ukraine's greenhouse gas inventory report 1990–2023* (587 p.). https://app.climatepolicyradar.org/document/ukraine-national-inventory-report-nir-2025_641b

3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories (Vol. 5: Waste)*. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>
4. U.S. Environmental Protection Agency. (2005). *Landfill gas emission model (LandGEM) version 3.02: User's guide* (48 p.). <https://www3.epa.gov/ttnecat1/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
5. Safranov, T. A., Prykhodko, V. Yu., & Shanina, T. P. (2017). Estimation of greenhouse gas emissions from municipal solid waste disposal sites: A critical analysis of methods and adaptation to the conditions of the Odessa region. *Bulletin of Odessa State Environmental University*, (21), 5–14. (in Ukrainian) [Сафранов, Т.А., Приходько, В.Ю., Шаніна, Т.П. (2017). Оцінка емісії парникових газів від місць захоронення ТПВ: критичний аналіз методик та адаптація до умов Одеської області. *Вісник ОДЕКУ*, 21, 5–14].
6. U.S. Environmental Protection Agency. (2012). *International best practices guide for landfill gas energy projects* (139 p.). https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_ibpgcomplete.pdf
7. Idrissi Oukili, A., Mouloudi, M., & Chhiba, M. (2022). LandGEM biogas estimation, energy potential and carbon footprint assessments of a controlled landfill site: Case of the controlled landfill of Mohammedia-Benslimane, Morocco. *Journal of Ecological Engineering*, 23(3), 116–129. <https://doi.org/10.12911/22998993/145410>
8. Fernandes da Silva, N., et al. (2020). First-order models to estimate methane generation in landfill: A case study in South Brazil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104053>
9. Dimishkovska, B., Berisha, A., & Lisichkov, K. (2019). Estimation of methane emissions from Mirash municipal solid waste sanitary landfill: Differences between IPCC 2006 and LandGEM method. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 19–41. <https://doi.org/10.12911/22998993/105332>
10. Saeedi, M., et al. (2025). LandGEM model parameters using a machine learning method to improve the accuracy of landfill methane gas generation estimates in the United States. *Journal of Environmental Management*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124029>
11. Dillah, D. D., et al. (2015). *New and improved implementation of the first-order model for landfill gas generation or collection*. SCS Engineers. https://scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Dillah-Panesar-Gornto-Dieleman_New_and_Improved_Implementation_of_First_Order_Model_for_LFG_Generation_or_Collection.pdf
12. Krause, M., & Thorneloe, S. (2024). *Landfill gas emissions model (LandGEM) version 3.1 user manual and tool*. U.S. EPA Office of Research and Development (EPA/600/B-24/160).
13. U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). *Greenhouse gas reporting rule (GHGRP) (40 CFR Part 98)*. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-98/subpart-HH>
14. Ganguli, S. (Ed.), & Stege, G. A. (Ed.). (2009). *Ukraine landfill gas model version 1.0: User's manual* (28 p.). U.S. EPA Landfill Methane Outreach Program. https://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_manual.pdf

Стаття надійшла до редакції 15.01.2026, надійшла після рецензування 12.03.2026, прийнята 04.04.2026

The article was received 15.01.2026, received after revision 12.03.2026, accepted 04.04.2026

Приходько Вероніка Юрївна

к.геогр.н., доцент, доцент кафедри екології та охорони довкілля, Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

Адреса робоча: вул. Львівська, 15, 65016 м. Одеса, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3854-6693> **e-mail:** vks26@ua.fm

УДК 502.51:504

Viacheslav Okhariev, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Acting Deputy Director for Scientific and Organizational Affairs of Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

Serhii Pidsadnii, Postgraduate of Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7406-500X> **e-mail:** sergiy.pidsadniy@gmail.com

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

TECHNOLOGY OF IMPROVING THE LAND USE DATA ACCURACY FOR GEOSPATIAL MODELING TASKS

Abstract. The aim of the research is increasing the accuracy of land cover classification (LULC) based on Dynamic World (DW) data for the controlled territory of Ukraine. One of the key problems of such data is the regional specificity of the land use regime, which reduces the reliability of the global average world classification. The basic accuracy of the DW classification for all of Ukraine is 51%, which is significantly lower than the declared one (~72%). The exclusion of occupied and frontline territories and partial re-verification of reference points allowed to increase the accuracy to 64.58%, Kappa coefficient (κ) 0.600. Methods for refining the classification based on the seasonal amplitude of NDVI and the summer phenology filter did not provide an increase in accuracy due to the significant spectral overlap of vegetation cover classes. The method of object-oriented analysis based on cadastral boundaries showed the inaccuracy of such an approach even at the stage of material preparation. Instead, the Random Forest machine learning model, built on NDVI phenological indicators, annual mean class, and DW probability bands, achieved an accuracy of 68.10%, Kappa 0.637, which corresponds to the category of substantial agreement and is the best result among the studied methods.

Keywords: geospatial modeling, land use data, machine learning.

В.О. Охарєв, С.Г. Підсадний

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

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ДАНИХ ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ ДЛЯ ЗАДАЧ ГЕОПРОСТОРОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Анотація. Дослідження присвячене підвищенню точності класифікації земного покриву (LULC) за даними Dynamic World (DW) для підконтрольної території України. Однією з ключових проблем таких даних є регіональна специфіка режиму землекористування, яка знижує достовірність глобальної середньосвітової класифікації. Базова точність класифікації DW для всієї України становить 51%, що суттєво нижче заявленої (~72%). Виключення окупованих та прифронтових територій і часткова повторна верифікація опорних точок дозволили підвищити точність до 64,58%, коефіцієнт Кappa (κ)

0,600. Методи уточнення класифікації на основі сезонної амплітуди NDVI та фільтру літньої фенології не забезпечили приросту точності через значне спектральне перекриття класів рослинного покриву. Метод об'єктно-орієнтованого аналізу на базі кадастрових меж ще на стадії підготовки матеріалу показав хибність такого підходу. Натомість модель машинного навчання Random Forest, побудована на фенологічних індикаторах NDVI, середньорічному класі та імовірнісних bands DW, досягла точності 68,10%, Каппа 0,637, що відповідає категорії суттєвої узгодженості та є найкращим результатом серед досліджених методів.

Ключові слова: геопросторове моделювання, дані землекористування, машинне навчання.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.72-82>

Вступ

У попередніх дослідженнях динаміки землекористування в Україні було застосовано класифікацію Dynamic World – глобальний продукт дистанційного зондування, розроблений Google та WRI, із заявленою точністю ~72%. Однак верифікація на основі репрезентативної вибірки виявила точність лише 51,15% для всієї території України [1], що свідчить про наявність специфічних регіональних факторів, які суттєво впливають на якість класифікації.

Одним із таких факторів є військові дії: починаючи з 2014 року близько 20% території України перебуває під окупацією або в зоні активних бойових дій, що призводить до порушення характерного патерну землекористування і ускладнює автоматичну ідентифікацію класів [2, 3]. Оскільки подальші дослідження передбачають аналіз процесів, пов'язаних зі сталим режимом господарювання (зокрема динаміки приповерхневої температури LST), зазначені території було виключено з аналізу.

Серед інших джерел помилок класифікації – плутанина між класом сільськогосподарських угідь (crops) та суміжними класами рослинного покриву. Структура агроландшафту України з переважанням великих монокультурних полів [5] теоретично створює передумови для чіткої диференціації класів на основі сезонної амплітуди NDVI [6] та фенологічних індикаторів [7]. Однак широкий діапазон подібності спектральних характеристик між класами зумовив необхідність застосування моделі машинного навчання Random Forest [8], яка враховує комплекс фенологічних параметрів разом з імовірнісними характеристиками класифікації DW.

Обмеження зони дослідження

Як показано попередньо [1], класифікація DW для всієї України демонструє точність нижчу заявлених ~22%. Така розбіжність пояснюється, зокрема, підвищеною просторово-часовою неоднорідністю землекористування внаслідок військових дій 2014-2024 рр. Значні площі сільськогосподарських угідь у зонах бойових дій тимчасово не обробляються або використовуються нерегулярно [2, 3], що ускладнює їх однозначну ідентифікацію алгоритмами класифікації.

З метою підвищення достовірності оцінки точності з аналізу було виключено: тимчасово окуповані території, 25-кілометрову буферну зону від лінії фронту та державного кордону з РФ (станом на літо 2024 р.), а також

окремі деокуповані регіони (рис. 1). Північ Київської та Чернігівської областей, деокуповані раніше, за даними Supporting Transparent Land Governance in Ukraine [9] у 2024 році мали відносно стабільний режим господарювання і були включені до аналізу.

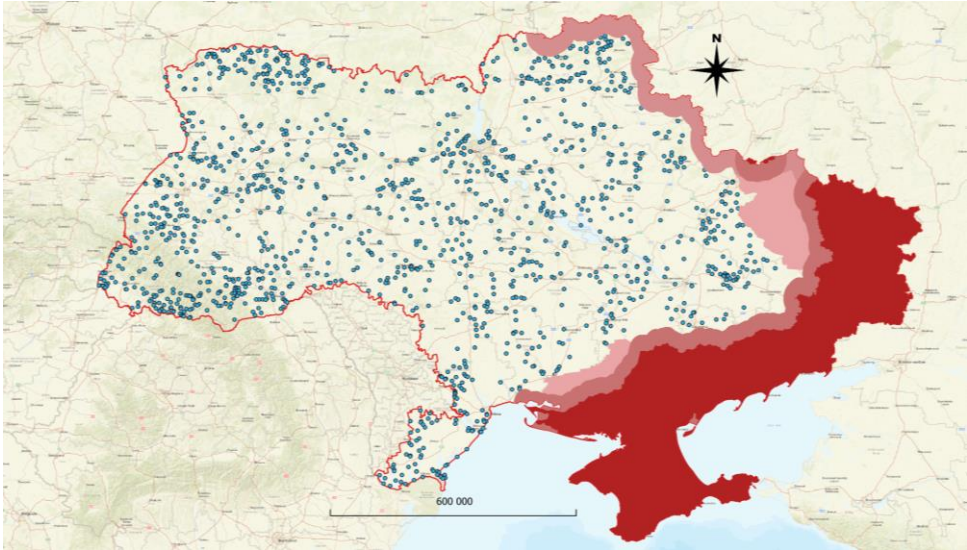


Рис. 1. Зони обмеження дослідження: окуповані території та буферні зони

Після виключення зазначених територій кількість верифікаційних точок зменшилась з 2168 до 1466. Для компенсації щільності вибірки було додано 534 нові точки методом випадкової стратифікованої вибірки та доведено до загальної кількості в 2000 точок. Щільність вибірки зросла з 0,0036 до 0,0046 т/км², що становить +28% та відповідає рекомендованим значенням [10]. До растру була застосована морфологічна фільтрація – фільтр просіювання (Sieve filter, < 5 пікселів) – та проведено операцію ерозії (3×3) для зменшення впливу змішаних пікселів. Верифікаційні точки розміщувались виключно в межах однорідних ділянок для мінімізації крайових ефектів.

Оновлена оцінка точності після перерахунку вибірки становила 58,7%, κ-0,53. Додатково було проведено повторну верифікацію 150 випадково обраних точок з підмножини невідповідностей між еталонними даними та результатами класифікації на основі багаточасових знімків Sentinel-2 за 2024 рік з виключенням дрібних анклавів (5-15 пікселів). У результаті точність зросла до 64,58%, κ-0,600 (рис. 2а).

Аналіз матриці помилок виявив, що основним джерелом невизначеності є плутанина між класом crops та класами рослинного покриття (trees, grass, flooded vegetation, shrub & scrub). Після об'єднання цих класів у єдину категорію (GZ) точність зросла до 76,14%, κ-0,661 (рис. 2b), що узгоджується із заявленими показниками продукту та свідчить про те, що класифікація надійно розрізняє рослинні та нерослинні класи, однак має суттєві труднощі у диференціації сільськогосподарських угідь та природної рослинності. Додатково виявлено плутанину між crops та bare ground, що пов'язано із сезонними змінами стану посівів (фенологічна плутанина).

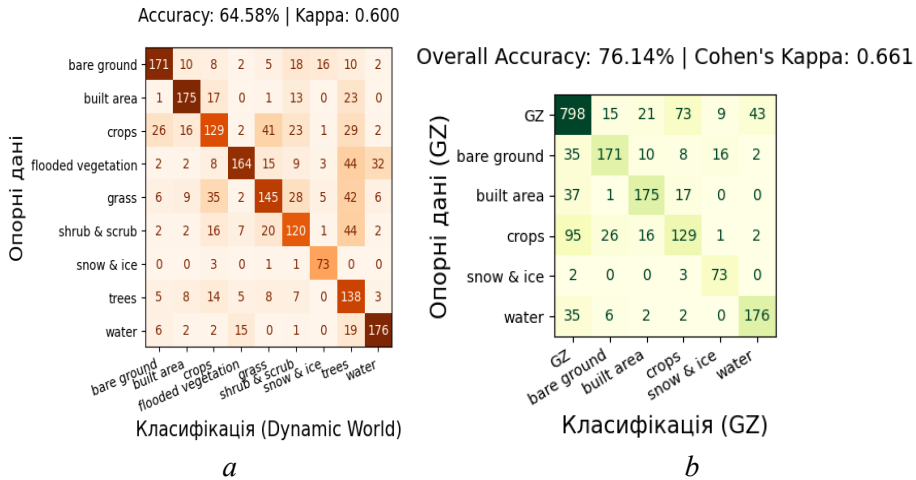


Рис. 2. Матриця помилок класифікації DW та верифікованих даних за 2024 р. Базова (а), з об'єднаним класом (б)

Об'єктно-орієнтований аналіз (OBIA)

Було розглянуто можливість використання кадастрових меж [11] як допоміжних даних для уточнення класу crops. Однак попередній аналіз показав, що категорії земельного призначення в кадастрі (land use) не забезпечують достатньої відповідності фактичному земному покриву (land cover): в межах ділянок сільськогосподарського призначення спостерігається значна внутрішня неоднорідність – лісосмуги, трав'яниста рослинність, забудова (рис. 3). Це призводить до систематичних помилок при агрегації на рівні ділянок, тому використання кадастрових меж для автоматизованої корекції класифікації було визнано недоцільним.

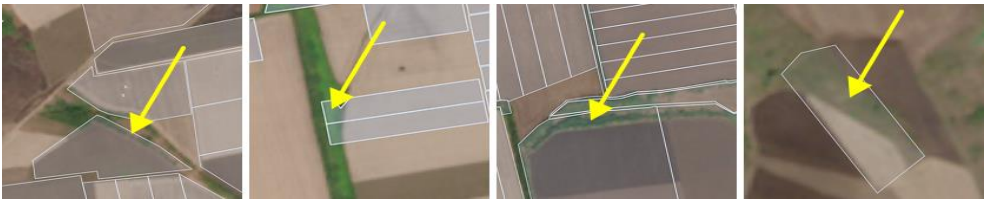


Рис. 3. Приклад кадастрових ділянок категорії Землі сільськогосподарського призначення, які включають в себе не тільки сільськогосподарські угіддя (crops), а і trees, grass та інші. Sentinel-2 L2A, 2024 р. Держгеокадастр [12]

NDVI amplitude та фільтр літньої фенології (SPF)

Оскільки класи crops, bare ground, grass та shrub & scrub можуть мати схожу спектральну характеристику в різні сезони, річна мода класифікації DW може відображати перехідні стани рослинності, що підвищує ймовірність помилкової ідентифікації. Щоб частково подолати це обмеження, застосовано метод NDVI amplitude у поєднанні з фільтром літньої фенології.

В основі методу NDVI amplitude лежить аналіз сезонної динаміки рослинності. Для сільськогосподарських угідь характерна висока сезонна амплітуда NDVI [6, 13], на відміну від інших класів (табл. 1).

Таблиця 1. Стабільність індексу NDVI в класах DW

клас	фенологічне вікно
trees	стабільно високий NDVI
grass	помірна сезонна зміна
scrub & scrub	відносно стабільний сигнал
crops	різкий сезонний пік (NDVI max (липень-серпень), NDVI min (квітень, жовтень))

Для NDVI amplitude застосовано поріг $> 0,45$ як індикатор інтенсивної сезонної зміни рослинності, характерної для crops. Однак даний метод може хибно спрацьовувати для пікселів природної трав'янистої рослинності, яка також демонструє сезонний пік влітку. Для зменшення цієї плутанини додатково застосовувався SPF, що обмежує аналіз класифікації літнім періодом (червень-серпень), коли більшість культур перебуває у фазі максимальної біомаси або демонструє різкий спад після збирання врожаю, а спектральний сигнал crops є найбільш вираженим.

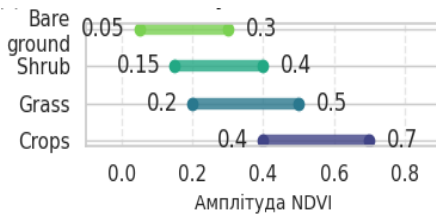


Рис. 4. Матриця помилок після реалізації методів NDVI amplitude та фільтру літньої фенології

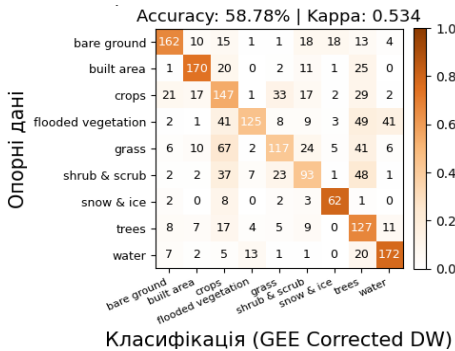


Рис. 5. Діапазон амплітуди NDVI для класів LULC в Україні

Матриця помилок (рис. 4) показала зниження точності до 58,78%, коефіцієнта Каппа до 0,534 порівняно з базовою DW. Проте потрібно врахувати величину похибки перепроєктування растру з EPSG:4326 в EPSG:3035, який був використаний для оцінки площ. Вона може становити 2-3% через реінтерполяцію пікселів, реальне зниження точності оцінюється в межах 2,95%-5,8%, κ -0,034-0,066. Підвищення рівня плутанини між crops та суміжними класами рослинності пояснюється тим, що природна трав'яниста рослинність України також демонструє літній спектральний сигнал, близький до crops. Класи не можуть бути надійно розрізнені виключно пороговими значеннями NDVI через значне перекриття їх діапазонів амплітуди (рис. 5).

Аналіз фенологічних порогів

Для детальнішої перевірки можливостей NDVI-корекції було відібрано точки вибірки, де DW помилково класифікував crops як grass, shrub, trees або flooded vegetation. Хмарні пікселі маскувались на основі SCL-каналу (Scene Classification Layer). Аналіз охопив 1364 точки з 2000, для яких були наявні безхмарні знімки у чотирьох фенологічних вікнах: T1 (березень), T2 (червень), T3 (серпень–вересень), T4 (жовтень). Розраховано індикатори сезонної динаміки NDVI: літнє падіння (T2-T3), весняне зростання (T2-T1), амплітуда (T2-min (T1,T4)). Аналіз показав, що медіанні значення NDVI у помилково класифікованих пікселях crops статистично не відрізняються від справжніх пікселів grass та shrub & shrub у жодному з фенологічних вікон – різниця медіан не перевищує 0,05-0,07 одиниць NDVI (рис. 6). Якість порогової корекції оцінювалась через показники:

$$F1 = 2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall}) ,$$

де Precision – частка істинних crops серед відібраних підозрілих пікселів, Recall – частка істинних crops серед усіх верифікованих точок crops, для яких індикатор перевищив заданий поріг.

При малих порогах (0,05-0,15) відбирається значна кількість пікселів (132-459) але лише 10-15% з них є реальними crops. При високих порогах ($\geq 0,30$) Precision зростає до 75-100%, але охоплює лише 1-8 пікселів, що унеможливує практичне застосування. Максимальне значення F1 = 0,14 при жодному з порогів не досягає прийнятного рівня – криві Precision і Recall розходяться без точки збалансованого перетину. Це свідчить про відсутність чіткої фенологічної межі між crops та суміжними класами за індикатором NDVI і підтверджує недостатність одновимірних спектральних ознак для надійної піксельної корекції.

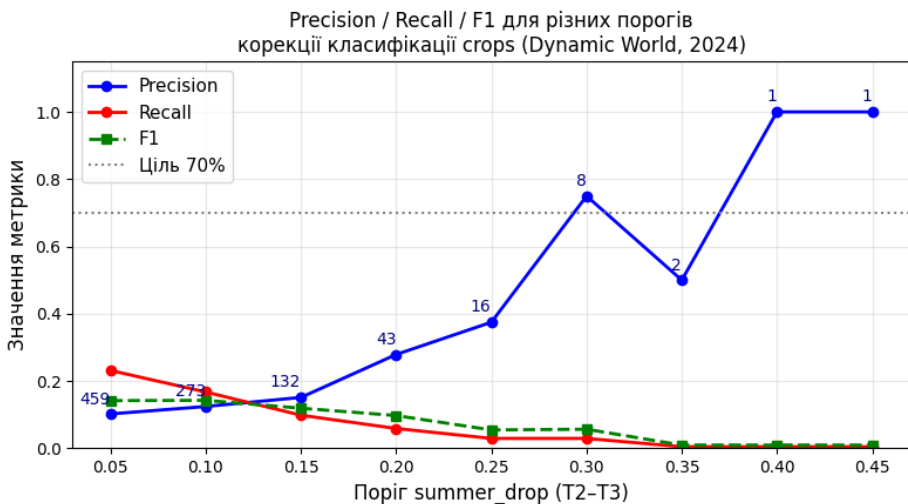


Рис. 6. Залежність Precision, Recall та F1-міри від порогового значення індикатора літнього падіння (різниця (NDVI(T2-T3))) при виявленні помилково класифікованих пікселів сільськогосподарських угідь (crops) серед класів grass, shrub, trees та flooded vegetation у класифікації DW (Sentinel-2 L2A, 2024 р.). Пунктирна лінія відповідає цільовому значенню точності 70%

Random Forest з DW probability bands

Глобально навчені класифікатори, такі як DW, часто демонструють систематичні помилки в регіонах зі специфічними агроландшафтними патернами, недостатньо представленими у глобальній навчальній вибірці. Досвід подібних досліджень показує, що навчання моделі на місцевих верифікованих даних помітно покращує результат порівняно з глобальними підходами. Продукт DW для кожного пікселя надає не лише домінуючий клас, але й середньорічні ймовірності належності до кожного з 9 класів (probability bands) – відкриті дані, доступні через Google Earth Engine. До прикладу індекс пікселя crops = 0,41 та grass = 0,38, що є значно менш надійним, ніж піксель з crops = 0,89. Така інформація про невизначеність класифікації може бути використана для її уточнення. Тому для корекції класів нами було застосовано алгоритм Random Forest (RF) [8] – метод, що будує множину незалежних дерев рішень і визначає клас голосуванням більшості, та забезпечує стійкість до перенавчання та здатність обробляти нелінійні залежності між ознаками [14, 15]. Модель реалізована засобами бібліотеки scikit-learn (Python) [16]. Для навчання моделі використано 17 ознак для 1242 верифікованих точок:

- фенологічні індикатори NDVI (Sentinel-2 L2A, маскування через SCL): значення NDVI у вікнах T1-T4, літнє падіння, весняне зростання, сезонна амплітуда;
- середньорічний клас DW за 2024 р.;
- DW probability bands: середньорічна ймовірність належності пікселя до кожного з 9 класів.

Клас пікселя визначався голосуванням $B = 500$ дерев:

$$\hat{y} = \operatorname{argmax} \sum_{b=1 \text{ до } B} I(h_b(x) = c),$$

де $\hat{y}$ – передбачений клас, h_b – b -те дерево рішень, x – вектор ознак, c – клас, I – індикаторна функція.

Вибірка розділена на тренувальну (70%, $n = 869$) і тестову (30%, $n = 373$) частини зі стратифікацією. Проведена 5-кратна крос-валідація для оцінки стабільності.



Рис. 7. Баланс виправлень класів моделі RF відносно DW. Тестова вибірка ($n = 373$ точки)

Результати

Модель RF досягла точності 68,10%, κ -0,637, що відповідає категорії “суттєвої узгодженості” за шкалою *Landis & Koch* [17] і є найкращим результатом серед усіх досліджених методів (табл. 2) та найбільш наближена до заявленої точності [18]. Стабільність підтверджена крос-валідацією: $67,32\% \pm 2,79\%$. Найбільший внесок у класифікацію зробили *probability bands flooded_vegetation*, *built area*, *water* та *bare ground*, що свідчить про більшу дискримінативну цінність інформації про невизначеність класифікації порівняно з фенологічними індикаторами NDVI окремо.

Аналіз балансу виправлень на тестовій вибірці (рис. 6) показав, що RF найефективніше виправив помилки для класів *crops* (+14), *flooded vegetation* (+11) та *bare ground* (+10), водночас погіршив класифікацію для *shrub & scrub* (-9) та *trees* (-9) – класів з найбільшим спектральним перекриттям.

Таблиця 2. Порівняння результатів методів підвищення точності класифікації LULC DW

метод	точність (accuracy)	коефіцієнт Каппа
Базовий (перепроєктований в EPSG:3035) DW	64.58%	0.600
Базовий DW (GEE)	61.73%	0.568
NDVI amplitude + summer filter	60.28%	0.551
RF + DW probability bands	68.10%	0.637

Висновки

Дослідження показало, що класифікація LULC DW, попри науково обґрунтовану загальну точність $> 70\%$, демонструє суттєве зниження якості для території України. Найбільший приріст точності (+10,6%-13,4%, κ -0,128-0,160) досягнуто шляхом виключення окупованих та прифронтових територій і часткової повторної верифікації опорних точок, що підтверджує значний вплив військового чинника на якість класифікації.

Методи на основі сезонної амплітуди NDVI та фільтру літньої фенології виявились неефективними через значне спектральне перекриття класів рослинного покриву в умовах України (зниження точності на 2,95%-5,8%).

Серед усіх випробуваних підходів найкращий результат показала модель RF – 68,10% точності, κ -0,637. Це максимально наближений результат до заявленої точності і є достатнім, щоб використовувати уточнену класифікацію як основу для подальшого аналізу землекористування. Перспективним напрямком для подальшого підвищення точності є включення даних радарного зондування Sentinel-1 SAR, які не залежать від хмарності та забезпечують додаткову інформацію про структуру поверхні.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Охарев, В., & Підсадний, С. (2025). Геоінформаційна технологія моніторингу динаміки структури землекористування на основі аналізу супутникових зображень. *Екологічна безпека та природокористування*, 55(3), 87–96. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.87-96>
2. Kussul, N., Shelestov, A., Yailymov, B., Yailimova, H., & Lemoine, G. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 140, 104551. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551>
3. Zavodiana, M., Ibatullin, Sh., Sakal, O., Kharytonenko, R., & Derkul'skyi, R. (2025). Detecting war-induced abandoned cropland in Ukraine using remote sensing. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552075>
4. Wang, W., Li, W., Zhang, C., & Zhang, W. (2018). Improving object-based land use/cover classification from medium resolution imagery by Markov chain geostatistical post-classification. *Land*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.3390/land7010031>
5. Столярчук, Н., & Крилов, М. (2026). Структура сільських територій України до та під час війни – економічні аспекти. *Економіка та суспільство*, (84). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-84-162>
6. Ramírez-Cuesta, J. M., Minacapilli, M., Motisi, A., Consoli, S., Intrigliolo, D. S., & Vanella, D. (2021). Characterization of the main land processes occurring in Europe (2000-2018) through a MODIS NDVI seasonal parameter-based procedure. *Science of The Total Environment*, 799, 149346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149346>
7. Dash, P., Sanders, S. L., Parajuli, P., & Ouyang, Y. (2023). Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data in an agricultural watershed. *Remote Sensing*, 15(16), 4020. <https://doi.org/10.3390/rs15164020>
8. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
9. World Food Programme. (n.d.). Ukraine Crop Maps. <https://ukraine-cropmaps.com/>
10. Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.015>
11. Hütt, C., Waldhoff, G., & Bareth, G. (2020). Fusion of Sentinel-1 with official topographic and cadastral geodata for crop-type enriched LULC mapping using FOSS and open data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 120. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020120>
12. State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre. (n.d.). Main page. <https://land.gov.ua/>
13. Сергєєва, К., Кавац, Ю., Ковров, О., & Чумичов, Д. (2025). Інформаційна технологія виявлення покинутих сільськогосподарських угідь на основі супутникового моніторингу. У *Системи контролю інформації та інтелектуальні технології: досягнення та застосування* (с. 197-211). <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-11>
14. Rodriguez-Galiano, V., Ghimire, B., Rogan, J., Chica, M., & Rigol-Sanchez, J. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93-104.
15. Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24-31.
16. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. (2012). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.

17. McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276-282. <https://hrcak.srce.hr/89395>
18. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., et al. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9, 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>

Стаття надійшла до редакції 29.01.2026, надійшла після рецензування 10.03.2026, прийнята 31.03.2026

REFERENCES

1. Okhariev, V., & Pidsadnii, S. (2025). Geoinformation technology for land use dynamics monitoring based on the analysis of satellite images. *Environmental Safety and Natural Resources*, 55(3), 87–96. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.3.87-96>
2. Kussul, N., Shelestov, A., Yailymov, B., Yailimova, H., & Lemoine, G. (2025). Assessment of war-induced agricultural land use changes in Ukraine using machine learning applied to Sentinel satellite data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 140, 104551. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551>
3. Zavodiana, M., Ibatullin, Sh., Sakal, O., Kharytonenko, R., & Derkul'skyi, R. (2025). Detecting war-induced abandoned cropland in Ukraine using remote sensing. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2025»* (pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202552075>
4. Wang, W., Li, W., Zhang, C., & Zhang, W. (2018). Improving object-based land use/cover classification from medium resolution imagery by Markov chain geostatistical post-classification. *Land*, 7(1), 31. <https://doi.org/10.3390/land7010031>
5. Stoliarchuk, N., & Krylov, M. (2026). Structura sil'skih teritorii Ukrainy do ta pid chas viyny – ekonomichni aspekty. *Ekonomika ta suspilstvo*, (84). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2026-84-162>
6. Ramírez-Cuesta, J. M., Minacapilli, M., Motisi, A., Consoli, S., Intrigliolo, D. S., & Vanella, D. (2021). Characterization of the main land processes occurring in Europe (2000-2018) through a MODIS NDVI seasonal parameter-based procedure. *Science of The Total Environment*, 799, 149346. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149346>
7. Dash, P., Sanders, S. L., Parajuli, P., & Ouyang, Y. (2023). Improving the accuracy of land use and land cover classification of Landsat data in an agricultural watershed. *Remote Sensing*, 15(16), 4020. <https://doi.org/10.3390/rs15164020>
8. Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
9. World Food Programme. (n.d.). Ukraine Crop Maps. <https://ukraine-cropmaps.com/>
10. Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.015>
11. Hütt, C., Walldhoff, G., & Bareth, G. (2020). Fusion of Sentinel-1 with official topographic and cadastral geodata for crop-type enriched LULC mapping using FOSS and open data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(2), 120. <https://doi.org/10.3390/ijgi9020120>
12. State Service of Ukraine for Geodesy, Cartography and Cadastre. (n.d.). Main page. <https://land.gov.ua/>
13. Sergeieva, K., Kavats, Y., Kovrov, O., & Chumichov, D. (2025). Informatsiyna tehnologiya vyavleniia pokynutyh sil'skohospodarskyh ugid na osnovi suputnykovoho monitoryngu. In *Systemy kontroliu informatsii ta intelektualni tehnologii: dosiagnennia ta zastosuvannia* (pp. 197-211). <https://doi.org/10.36059/978-966-397-538-2-11>

14. Rodriguez-Galiano, V., Ghimire, B., Rogan, J., Chica, M., & Rigol-Sanchez, J. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93-104.
15. Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24-31.
16. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E. (2012). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.
17. McHugh, M. L. (2012). Interrater reliability: the kappa statistic. *Biochemia Medica*, 22(3), 276-282. <https://hrcak.srce.hr/89395>
18. Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., et al. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9, 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>

The article was received 29.01.2026, received after revision 10.03.2026, accepted 31.03.2026

Охарєв Вячеслав Олександрович

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу природних ресурсів, в.о. заступника директора з науково-організаційної роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** okhariev.vo@gmail.com

Підсадній Сергій Григорович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-7406-500X3> **e-mail:** sergiy.pidsadny@gmail.com

UDC 502.4:504.06:528.8(477)

Nataliia Magas¹, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-1465> **e-mail:** nataly.magas@gmail.com

Olha Tomchenko², Candidate of Technical Sciences, Senior researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099> **e-mail:** tomch@i.ua

Snizhana Zahorodnia³, Candidate of Technical Sciences, Senior researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4332-4211> **e-mail:** Zagorodnya.s@gmail.com

Natalia Sheviakina, Candidate of Technical Sciences, Independent Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-5580> **e-mail:** n.a.sheviakina@gmail.com

¹Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

²State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth» of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

BIODIVERSITY THREAT INDEX: METHODOLOGY AND APPLICATION FOR EMERALD NETWORK SITES UNDER CATASTROPHIC FLOOD CONDITIONS

Abstract. Purpose. To develop and apply the Biodiversity Threat Index (BTI) as a quantitative tool for prioritizing post-disaster restoration of Emerald Network sites under conditions of limited field data availability.

Method. The BTI integrates five normalised indicators: flood coverage (F , $w = 0.30$), number of protected bird species under Bern Convention Resolution No. 6 (B , $w = 0.22$), number of habitat types under Resolution No. 4 (H , $w = 0.18$), other protected species (S , $w = 0.12$), and the normalised weighted flood impact area accounting for ecosystem vulnerability (W , $w = 0.18$). All indicators were normalised by min–max scaling. Weights were assigned by expert judgement and tested by $\pm 10\%$ sensitivity variation. The index was applied to 11 Emerald Network sites of the steppe biogeographical region affected by the catastrophic flood caused by the Kakhovka Dam failure on 6 June 2023. Flood extent was assessed using a satellite-derived flood mask based on Sentinel-2, Landsat-9, and Sentinel-1 data processed in Google Earth Engine.

Findings. Three sites received a critical threat class ($BTI \geq 0.70$): Black Sea Biosphere Reserve (0.945), Dnipro-Bug Estuary (0.789), and Biloberezhzhia Sviatoslava National Nature Park (0.705), while the Lower Dnipro site (0.687) belonged to the high threat class. The Black Sea Biosphere Reserve ranked first because of the highest concentration of protected biodiversity features (180), despite not having the maximum flood percentage (80.5%). Sensitivity analysis confirmed the robustness of the index: the ranking of the top four sites remained unchanged under $\pm 10\%$ weight variation.

Theoretical significance. The study contributes to the development of an integrated methodological framework for biodiversity-risk assessment in protected areas affected by catastrophic events by combining spatial flood indicators with species, habitat, and ecosystem-vulnerability characteristics.

Practical significance. The proposed index can be used to support post-disaster management, restoration prioritization, and allocation of limited conservation resources for Emerald Network sites where field verification is constrained or impossible.

Scientific novelty. The study proposes a reproducible quantitative index that moves beyond simple flood-area ranking and enables integrated prioritization of Emerald Network sites on the basis of both physical impact and conservation value.

Future research. The BTI relies on Emerald Network Standard Data Forms and remotely sensed flood estimates; therefore, it reflects the documented conservation value of sites rather than direct post-disaster field observations. Further research should refine the ecosystem-vulnerability component and test the method on other types of environmental disasters and in other regions.

Keywords: Emerald Network; post-disaster restoration; remote sensing; prioritization; Biodiversity Threat Index; ecosystem restoration.

Н.І. Магась¹, О.В. Томченко², С.А. Загородня³, Н.А. Шевякіна

¹Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

²ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі» ІГН НАН України, м. Київ, Україна

³Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ІНДЕКС ЗАГРОЗИ БІОРІЗНОМАНІТТЮ: МЕТОДИКА ТА АПРОБАЦІЯ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ СМАРАГДОВОЇ МЕРЕЖІ В УМОВАХ КАТАСТРОФІЧНОГО ЗАТОПЛЕННЯ

Анотація. Мета дослідження. Розробити та апробувати Індекс загрози біорізноманіттю (ІЗБ) як кількісний інструмент пріоритизації післяаварійного відновлення об'єктів Смарагдової мережі за умов дефіциту польових даних.

Методи дослідження. ІЗБ інтегрує п'ять нормалізованих показників: частку затоплення (F , $w = 0,30$), кількість охоронюваних видів птахів за Резолюцією № 6 Бернської конвенції (B , $w = 0,22$), кількість типів оселищ за Резолюцією № 4 (H , $w = 0,18$), інші охоронювані види (S , $w = 0,12$) та нормалізовану зважену площу впливу з урахуванням вразливості екосистеми (W , $w = 0,18$). Усі показники нормалізовано методом $\min\text{--}\max$. Вагові коефіцієнти визначено експертно, а їх стійкість перевірено варіюванням у межах $\pm 10\%$. Апробацію виконано на 11 об'єктах Смарагдової мережі степового біогеографічного регіону, що зазнали впливу катастрофічного затоплення, спричиненого руйнуванням Каховської ГЕС 6 червня 2023 р. Просторовий масштаб затоплення оцінено за маскою затоплення, отриманою за даними Sentinel-2, Landsat-9 та Sentinel-1 у середовищі Google Earth Engine.

Результати дослідження. Критичний клас загрози ($\text{ІЗБ} \geq 0,70$) встановлено для трьох об'єктів: Чорноморського біосферного заповідника (0,945), Дніпровсько-Бузького лиману (0,789) та НПП «Білобережжя Святослава» (0,705), тоді як об'єкт «Нижній Дніпро» (0,687) належить до високого класу загрози. Показано, що першу позицію в рейтингу посів Чорноморський біосферний заповідник завдяки найвищій концентрації біорізноманіття (180 ознак), а не максимальному відсотку затоплення (80,5%). Аналіз чутливості підтвердив стійкість результатів: порядок перших чотирьох позицій не змінюється при варіюванні вагових коефіцієнтів у межах $\pm 10\%$.

Теоретичне значення дослідження. Дослідження розвиває методичний підхід до інтегральної оцінки загрози біорізноманіттю для природоохоронних територій, що зазнали катастрофічного впливу, шляхом поєднання просторових показників затоплення з видовою, оселищною та екосистемною характеристикою об'єктів.

Практичне значення дослідження. Запропонований індекс може бути використаний для післяаварійного управління, визначення пріоритетів відновлення та розподілу обмежених природоохоронних ресурсів для об'єктів Смарагдової мережі в умовах обмеженого або відсутнього польового доступу.

Наукова новизна дослідження. Запропоновано відтворюваний кількісний індекс, який, на відміну від простого ранжування за площею або часткою затоплення, забезпечує інтегральну пріоритизацію об'єктів Смарагдової мережі з урахуванням як фізичного масштабу впливу, так і їх природоохоронної цінності.

Перспективи подальших досліджень. ІЗБ базується на Стандартних формах даних Смарагдової мережі та дистанційно визначених межах затоплення, тому відображає документовану природоохоронну цінність територій, а не прямі польові спостереження після катастрофи. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення компоненти екосистемної вразливості та апробацію методу для інших типів екологічних катастроф і регіонів.

Ключові слова: Смарагдова мережа; післяаварійне відновлення; дистанційне зондування; пріоритизація; Індекс загрози біорізноманіттю; відновлення екосистем.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.83-95>

Постановка задачі

Катастрофічні техногенні події – руйнування гребель, промислові аварії, наслідки збройних конфліктів – завдають масштабної шкоди природоохоронним об'єктам. Ключовою управлінською проблемою в післяаварійний період є відсутність науково обґрунтованих критеріїв пріоритизації: обмежені ресурси для відновлення не можуть розподілятися рівномірно між усіма постраждалими об'єктами. Особливої гостроти ця проблема набуває для мережевих систем природоохоронних територій, де об'єкти характеризуються різною видовою цінністю, різними типами екосистем і різним ступенем вразливості.

Руйнування греблі Каховської гідроелектростанції 6 червня 2023 р. внаслідок збройного конфлікту спричинило затоплення 620 км² дельти Дніпра – найбільшу техногенну екологічну катастрофу в Україні після 1986 р. [1, 2]. В зоні затоплення опинилися численні об'єкти природно-заповідного фонду та Смарагдової мережі. Окупація постраждалих територій унеможливило польові дослідження, що робить дистанційне зондування практично єдиним інструментом незалежної кількісної оцінки [4, 23].

За цих умов ключовою науково-практичною задачею є розроблення відтворюваного інструменту кількісної пріоритизації об'єктів Смарагдової мережі, який поєднував би просторовий масштаб затоплення з біотичною та оселищною цінністю територій і міг би застосовуватися в умовах дефіциту польових даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Руйнування великих гребель належить до найбільш масштабних форм антропогенно зумовленого впливу на заплавні та прибережно-водні екосистеми. Tockner and Stanford [7] показали, що заплавні угіддя є одними з найбільш продуктивних і водночас найбільш уразливих екосистем планети. Arnold [9] та Malmqvist and Rundle [8] розглядали повені як техногенні катастрофи з довготривалими наслідками. Вплив прибережних повеней висвітлено в роботах Woodruff et al. [10] і Wang et al. [11].

Вплив російсько-української війни на природні комплекси України узагальнено в роботах Hartmane et al. [4], Pereira et al. [5] та Rawtani et al. [6]. Gleick et al. [1] і Vyshnevskiy et al. [2] задокументували безпосередні наслідки руйнування Каховської греблі. Napich et al. [16] проаналізували наслідки для водної безпеки регіону, а Shumilova et al. [3] виконали комплексну оцінку впливу збройного конфлікту на водні ресурси України. Методичні підходи до застосування дистанційного зондування для моніторингу природоохоронних об'єктів цього регіону представлено в роботах Trofymchuk et al. [14], Tomchenko et al. [15] та Zheng et al. [21], тоді як використання таких методів в умовах збройних конфліктів розглядали Al-doski et al. [22] і Xu et al. [23].

Попри наявні публікації, наукова література досі не пропонує відтворюваного інтегрального інструменту, який поєднував би просторовий масштаб затоплення з видовою, оселищною та екосистемною цінністю природоохоронних територій для цілей післяаварійної пріоритизації. Наявні підходи або обмежуються оцінкою частки затоплення, або мають якісний експертний характер і не забезпечують кількісного порівняння об'єктів із різною природоохоронною значущістю. У зв'язку з цим актуальним є розроблення Індексу загрози біорізноманіттю як інструменту кількісного ранжування об'єктів Смарагдової мережі в умовах катастрофічного затоплення.

Мета дослідження

Метою дослідження є розроблення, обґрунтування та апробація Індексу загрози біорізноманіттю як інструменту кількісної пріоритизації об'єктів Смарагдової мережі для цілей післяаварійного управління на матеріалах катастрофічного затоплення дельти Дніпра у червні 2023 р.

Методика дослідження

Для кількісної пріоритизації 11 об'єктів Смарагдової мережі степового біогеографічного регіону, що зазнали впливу катастрофічного затоплення 2023 р., запропоновано Індекс загрози біорізноманіттю:

$$ІЗБ = 0,30 \cdot F + 0,22 \cdot B + 0,18 \cdot H + 0,12 \cdot S + 0,18 \cdot W,$$

де F – нормалізована частка затоплення території; B – нормалізована кількість охоронюваних видів птахів за Резолюцією № 6 Бернської конвенції; H – нормалізована кількість типів оселищ за Резолюцією № 4; S – нормалізована кількість інших охоронюваних видів; W – нормалізована зважена площа впливу з урахуванням вразливості екосистеми.

Частку затоплення визначали як відношення площі затоплення до загальної площі об'єкта за результатами просторового перетину маски затоплення (09.06.2023) з межами об'єктів у середовищі Google Earth Engine. Показники В, Н і S отримано зі Стандартних форм даних об'єктів Смарагдової мережі [18] та офіційних переліків Бернської конвенції [16, 17]. Коефіцієнт вразливості V визначали у діапазоні від 0 до 1 залежно від домінуючого типу екосистеми; зважену площу впливу обчислювали як добуток $V \cdot A$, після чого цей показник нормалізували й використовували у формулі як W.

Усі показники нормалізовано методом min-max: $X = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$. Це забезпечує порівнянність показників з різними одиницями виміру та незалежність від розміру вибірки.

Вагові коефіцієнти визначено експертно за принципом домінування безпосереднього масштабу затоплення (F, 0,30) та рівного врахування видово-оселищної цінності і зваженого просторового впливу ($B+H+S+W = 0,70$). Пріоритет компоненти В (0,22) обґрунтовано роллю птахів як флагманських індикаторів стану водно-болотних екосистем [18]. Стійкість рейтингу перевірено варіюванням усіх вагових коефіцієнтів у межах $\pm 10\%$ – порядок перших чотирьох позицій залишається незмінним.

На підставі аналізу розподілу значень ІЗБ та з урахуванням практичних потреб управління визначено чотири класи загрози: критична ($ІЗБ \geq 0,70$), висока (0,50–0,69), помірна (0,30–0,49), низька ($< 0,30$). Межа 0,70 відповідає порогу критичного статусу за критеріями Червоного списку екосистем МСОП [29].

Таким чином, ІЗБ поєднує безпосередній просторовий масштаб затоплення з біотичною та оселищною цінністю території, що дає змогу перейти від простого картографування ураження до кількісної пріоритизації відновлення.

Маска затоплення (09.06.2023) отримана методами ДЗЗ в середовищі QGIS: нормалізований диференціальний водний індекс Sentinel-2/Landsat-9 та радарна класифікація Sentinel-1, верифікована через базу глобального поверхневого водного покриття [13]. Межі об'єктів Смарагдової мережі та Стандартні форми даних – офіційний список T-PVS/PA(2023)08 [19]. Просторовий аналіз виконано в QGIS 3.28.

Результати дослідження

Застосування Індексу загрози біорізноманіттю до 11 об'єктів Смарагдової мережі показало, що пріоритетність післяаварійного відновлення визначається не лише часткою затоплення, а й концентрацією охоронюваних видів, оселищ та вразливістю екосистем. Усі об'єкти розташовані в межах степового біогеографічного регіону (Херсонської, Миколаївської та Одеської областей) і є частиною Дніпровського міграційного коридору птахів (понад 400 видів, близько 100 гідрофільних). Загальна площа охоплених об'єктів становить понад 415 тис. га. Просторове розміщення об'єктів Смарагдової мережі та межі затоплення станом на 09.06.2023 наведено на рис. 1.

У таблиці 1 узагальнено систему показників, покладених в основу розрахунку ІЗБ, що дає змогу простежити відмінності між об'єктами за рівнем затоплення, видово-оселищною насиченістю та екосистемною вразливістю. Діапазон вихідних показників свідчить про суттєву неоднорідність об'єктів за природоохоронною цінністю та чутливістю до затоплення. Кількість

охоронюваних ознак ($V + H + S$) змінюється від 18 (ТУ, ТЛ) до 180 (ЧБЗ), частка затоплення – від 2,7% (ОП) до 98,5% (ДБЛ), тоді як коефіцієнт вразливості V є найвищим для відкритих водно-болотних комплексів (0,9–1,0) і найнижчим для лісово-степових ділянок (0,3–0,5).

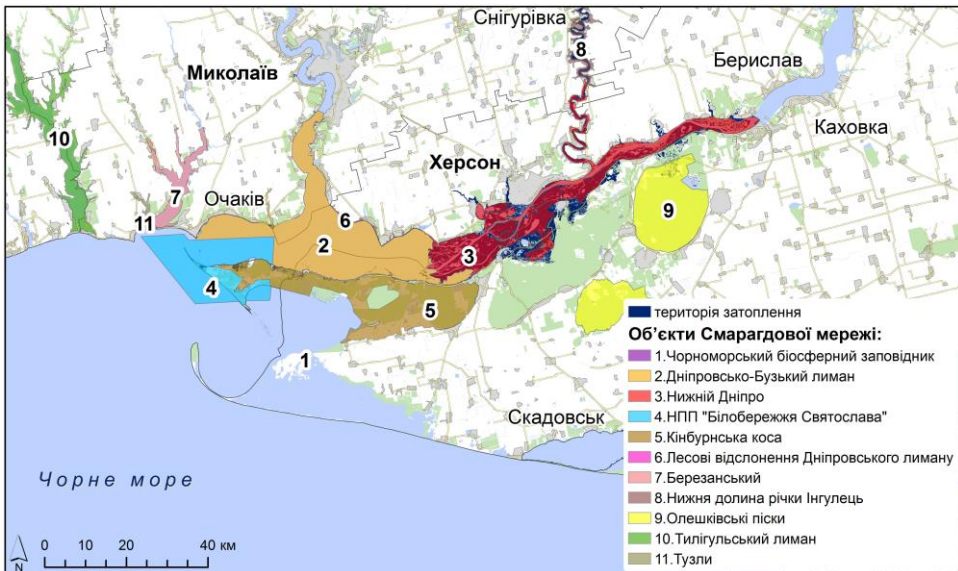


Рис. 1. Просторове розміщення об'єктів Смарагдової мережі, що зазнали впливу внаслідок руйнування Каховської греблі

Примітка. Цифрова нумерація об'єктів відповідає табл. 1.

На основі наведених у табл. 1 вхідних даних розраховано значення ІЗБ та виконано класифікацію об'єктів за рівнями загрози (рис. 2–5). Критичний клас загрози ($ІЗБ \geq 0,70$) отримали три об'єкти, тоді як об'єкт «Нижній Дніпро» (0,687) належить до високого класу і безпосередньо наближається до критичного порогу.

Чорноморський біосферний заповідник ($ІЗБ = 0,945$) посів першу позицію завдяки найвищій концентрації охоронюваного біорізноманіття – 180 охоронюваних ознак (68 видів птахів, 86 видів інших тварин і рослин, 26 типів оселищ). Це є принциповим методичним результатом: попри те, що заповідник не має максимального відсотка затоплення (80,5%), саме концентрація охоронюваного біорізноманіття визначає його найвищу позицію в рейтингу. Отже, просте ранжування за часткою затоплення вивело б на перше місце Дніпровсько-Бузький лиман (98,5%), але не відобразило б виняткову природоохоронну цінність Чорноморського біосферного заповідника.

Дніпровсько-Бузький лиман (0,789) вирізняється найбільшою абсолютною площею нових затоплень суходолу (26 374 га), що зумовлює його друге місце в рейтингу. НПП «Білобережжя Святослава» (0,705) безпосередньо входить до критичного класу, тоді як об'єкт «Нижній Дніпро» (0,687) лише незначно поступається цьому порогу, що вказує на високий рівень загрози для територій з насиченими водно-болотними оселищами.

Таблиця 1. Перелік об'єктів Смарагдової мережі, що зазнали впливу внаслідок затоплення станом на 09.06.2023

Джерело: Т-PVS/PA(2023)08 [19]; власний аналіз авторів

№	Назва об'єкта Смарагдової мережі	Площа	Затоплення	Птахи	Інші види	Оселища	Разом ознак
1	Чорноморський біосферний заповідник	115 873	80,5	127	25	28	180
2	Дніпровсько- Бузький лиман	71 276	98,5	93	18	15	126
3	Нижній Дніпро	52 386	88,3	55	23	20	98
4	Національний природний парк «Білобережжя Святослава»	35 242	87,8	95	15	23	133
5	Кінбурнська коса	46 588	6,8	63	7	12	82
6	Лесові відслонення Дніпровського лиману	589,2	3,1	8	1	3	12
7	Березанський	8 827	75,3	41	6	4	51
8	Нижня долина річки Інгулець	13 571	21,3	0	5	13	18
9	Олешківські піски	46 259	1,0	45	8	15	68
10	Тилігульський лиман	23 243	33,4	45	9	16	70
11	Тузли	1 357	40,5	34	1	5	40

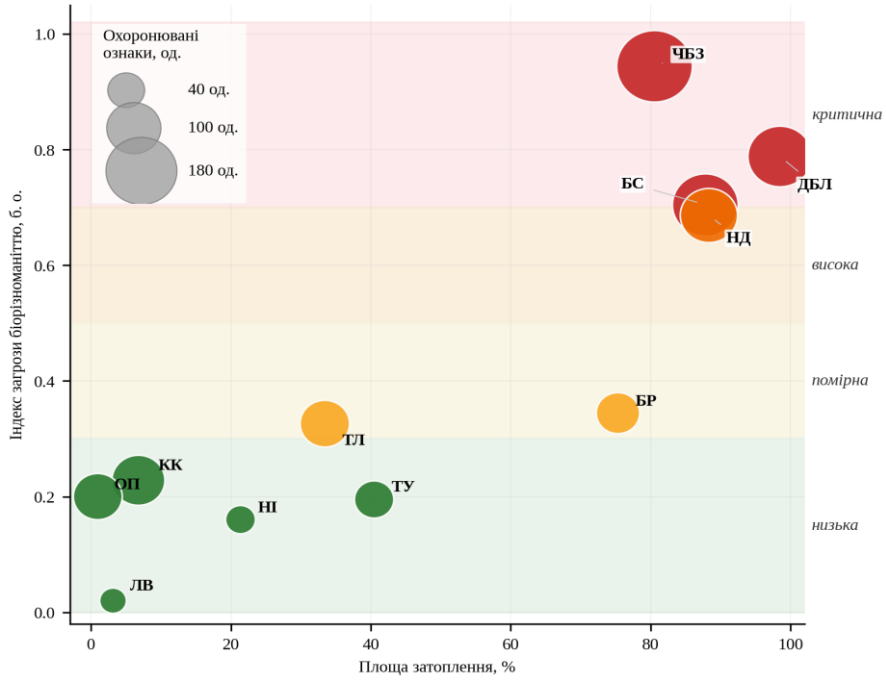


Рис. 2. Матриця «Площа затоплення (%) – Індекс загрози біорізноманіттю» для об'єктів Смарагдової мережі; розмір кола – кількість охоронюваних ознак, од.

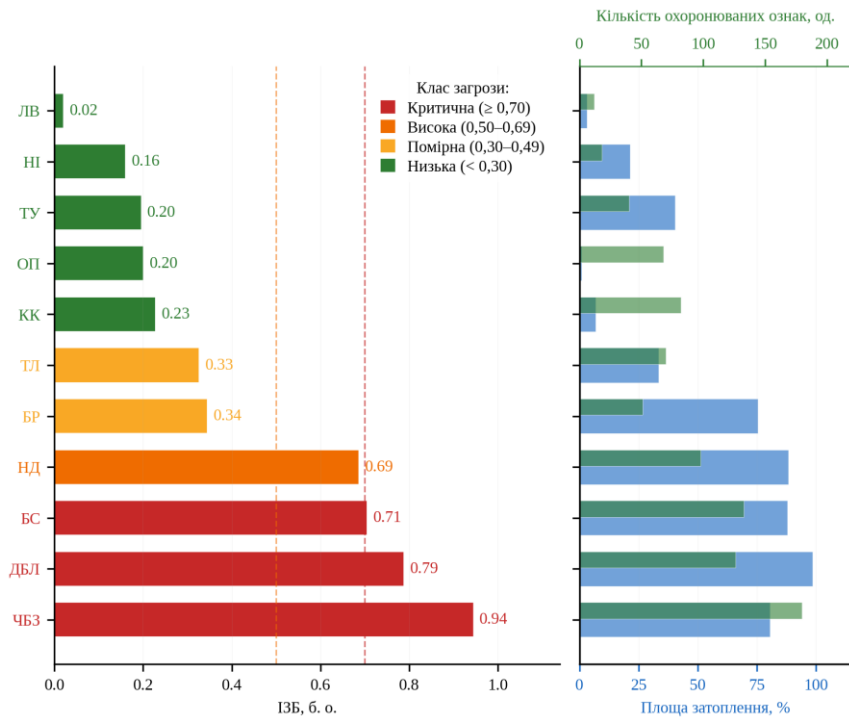


Рис. 3. Ранжування об'єктів Смарагдової мережі за пріоритетністю відновлення: ліва панель – значення ІЗБ за класами загрози; права панель – площа затоплення (%) та кількість охоронюваних ознак (од.)

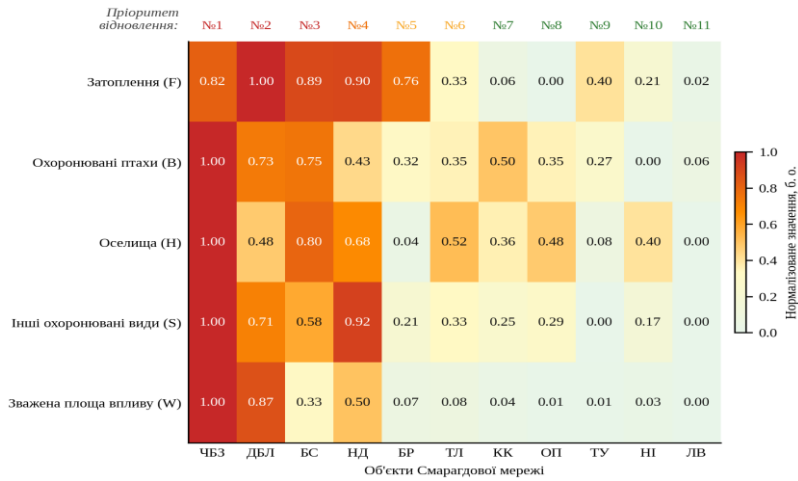


Рис. 4. Теплова карта нормалізованих компонентів ІЗБ для об'єктів Смарагдової мережі з пріоритетами відновлення

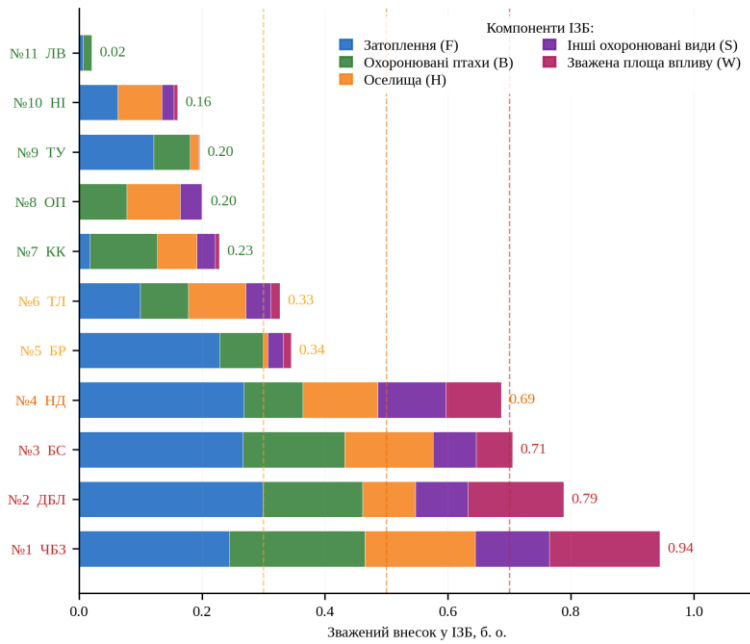


Рис. 5. Зважений внесок компонентів у ІЗБ для об'єктів Смарагдової мережі у порядку пріоритетності відновлення

Для перевірки стійкості рейтингу виконано варіювання вагових коефіцієнтів у діапазоні $\pm 10\%$ ($\Delta w = \pm 0,03$ для F; $\pm 0,02$ для В, Н, S, W) при дотриманні умови $\Sigma w = 1$. Порядок перших чотирьох позицій рейтингу залишається незмінним при всіх комбінаціях варіювання. Зміни відбуваються лише в межах помірного та низького класів, що підтверджує надійність верхньої частини рейтингу. Максимальне відхилення значення ІЗБ від базового розрахунку становить 0,038 (3,8%), що є прийнятним для інструменту підтримки управлінських рішень.

Одержані результати підтверджують, що інтегральна оцінка загрози біорізноманіттю дає змістовно інший результат, ніж просте ранжування за площею або часткою затоплення. Запропонований ІЗБ дозволяє врахувати не лише фізичний масштаб ураження, а й природоохоронну цінність територій, що особливо важливо для об'єктів Смарагдової мережі з високою концентрацією охоронюваних видів і оселищ.

Результати апробації узгоджуються з висновками Gleick et al. [1] та Shumilova et al. [3] щодо системного характеру екологічних наслідків катастрофи. Пріоритетність Чорноморського заповідника, яка не є очевидною при простому аналізі площі затоплення, підтверджує необхідність інтеграції показників біорізноманіття у процедури післяаварійного управління відповідно до Стратегічного плану Бернської конвенції [20].

ІЗБ може бути адаптований для інших типів катастроф (лісових пожеж, хімічних забруднень) шляхом заміни компоненти F на відповідний просторовий показник впливу. На відміну від попередніх робіт, орієнтованих переважно на загальну оцінку наслідків катастрофи, запропонований підхід формалізує відтворюваний інструмент кількісної пріоритизації об'єктів Смарагдової мережі для задач післяаварійного управління. Метод є відтворюваним у будь-якому регіоні, де доступні Стандартні форми даних Бернської конвенції та супутникові знімки.

Поточна версія ІЗБ має такі обмеження: (1) компоненти B, H, S відображають потенційну присутність видів і оселищ згідно зі Стандартними формами даних, а не їх фактичний стан на момент катастрофи; (2) коефіцієнт вразливості V визначається на рівні домінуючого типу екосистеми без урахування внутрішньоділянкової гетерогенності; (3) аналіз відновлення екосистем потребує оновлення знімків 2024–2025 рр. Ці обмеження не знижують операційну придатність ІЗБ для пріоритизації в умовах дефіциту польових даних.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Розроблено Індекс загрози біорізноманіттю (ІЗБ) – п'ятикомпонентний зважений індекс для кількісної пріоритизації об'єктів Смарагдової мережі після катастрофічних подій. Методика є повністю відтворюваною та базується на загальнодоступних джерелах даних.

Апробація на 11 об'єктах Смарагдової мережі, постраждалих від руйнування Каховської ГЕС (06.06.2023), підтвердила операційну придатність ІЗБ: три об'єкти отримали критичний клас загрози ($\geq 0,70$) – Чорноморський біосферний заповідник (0,945), Дніпровсько-Бузький лиман (0,789) і НПП «Білобережжя Святослава» (0,705), тоді як об'єкт «Нижній Дніпро» (0,687) належить до високого класу загрози.

Методологічна перевага ІЗБ над простим ранжуванням за відсотком затоплення доведена на прикладі Чорноморського заповідника: при затопленні 80,5% площі він посів першу позицію завдяки найвищій концентрації охоронюваного біорізноманіття (180 ознак).

Стійкість рейтингу підтверджена аналізом чутливості: порядок перших чотирьох позицій залишається незмінним при варіюванні вагових коефіцієнтів у межах $\pm 10\%$.

Запропоновану методику доцільно застосовувати як інструмент первинної кількісної пріоритизації природоохоронних об'єктів у післяаварійних умовах, насамперед за дефіциту польових даних та обмеженого доступу до території. Перспективами є адаптація ІЗБ для інших типів катастроф та перевірка на основі знімків 2024–2025 рр.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Gleick, P. H., Iceland, C., & Donnelly, K. (2023). Attacks on Ukraine's water and energy infrastructure. Pacific Institute.
2. Vyshnevskiy, V., Shevchuk, S., & Komorin, V. (2023). The Kakhovka Dam failure: an analysis of causes and consequences. *Water*, 15(18), 3275. doi: 10.3390/w15183275
3. Shumilova, O., Tockner, K., Sukhodolov, A., Khilchevskiy, V., De Meester, L., Stepanenko, S., Trokhymenko, G., Hernández-Agüero, J. A., & Gleick, P. (2023). Impact of the Russia–Ukraine armed conflict on water resources and water security. *Nature Sustainability*, 6, 578–586. doi: 10.1038/s41893-023-01068-x
4. Hartmane, D., Vinogradova, S., & Luoto, M. (2024). War-induced environmental damage in Ukraine. *Environmental Research Letters*, 19(1), 014054.
5. Pereira, P., Bašić, F., Bogunovic, I., & Barcelo, D. (2023). Russian–Ukrainian war impacts the total environment. *Science of the Total Environment*, 855, 158868.
6. Rawtani, D., Gupta, G., Khatri, N., Rao, P. K., & Hussain, C. M. (2022). Environmental damages due to war in Ukraine: a perspective. *Science of the Total Environment*, 850, 157932.
7. Tockner, K., & Stanford, J. A. (2002). Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, 29(3), 308–330.
8. Malmqvist, B., & Rundle, S. (2002). Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, 29(2), 134–153.
9. Arnold, J. G. (2019). Floodplain management and river restoration. *Ecological Engineering*, 128, 50–58.
10. Woodruff, J. D., Irish, J. L., & Camargo, S. J. (2013). Coastal flooding by tropical cyclones and sea-level rise. *Nature*, 504, 44–52.
11. Wang, J., He, T., Liao, M., & Zhao, Z. (2019). Dam break flood simulation. *Water*, 11(12), 2499.
12. UNOSAT. (2023). Satellite-based flood delineation in Ukraine (Kherson region). UNITAR-UNOSAT.
13. Trofymchuk, O., Kreta, D., & Myrontsov, M. (2021). Remote sensing assessment of the nature reserve fund of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 30(2), 392–403.
14. Tomchenko, O., Sedlerova, O., Lialko, V., Zholobak, H., Efymentko, T., & Khodorovskiy, A. (2022). Suputnykovyi monitorynh roslynnosti [Satellite monitoring of vegetation in protected areas of Ukraine]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia*, 9(2), 41–51. (in Ukrainian)
15. Hapich, H., Orlinska, O., Chushkina, I., Pavlychenko, A., Chebotarova, S., & Filatova, I. (2023). Assessment of the Kakhovka Dam destruction consequences for water security. *Journal of Water and Land Development*, 59(X–XII), 165–172.
16. Council of Europe. (2011). Resolution No. 4 (1996) listing natural habitat types requiring specific conservation measures. Bern Convention.
17. Council of Europe. (2022). Resolution No. 6 (1998) on the protection of bird species in Europe. Bern Convention.
18. Council of Europe. (2023). Standard Data Forms for Emerald Network sites in Ukraine. T-PVS/PA(2023)08.
19. Council of Europe. (2022). Strategic Plan for the Bern Convention 2030. T-PVS(2022)04.
20. Zheng, H., Song, C., & Xu, C. (2022). Remote sensing for biodiversity assessment in protected areas. *Remote Sensing*, 14(5), 1132.
21. Al-doski, J., Mansor, S. B., & Shafri, H. Z. (2014). NDVI differencing and post-classification for detecting vegetation changes. *Journal of Environmental Geography*, 7(3–4), 37–44.

22. Xu, C., Su, G., & Liu, L. (2021). Monitoring of natural protected areas using remote sensing: a review. *Remote Sensing*, 13(16), 3234.
23. CEOBS. (2023). Mapping environmental damage from the Kakhovka dam failure. Conflict and Environment Observatory.
24. Noss, R. F. (1990). Indicators for monitoring biodiversity: a hierarchical approach. *Conservation Biology*, 4(4), 355–364.
25. Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., & Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145–148.
26. Ricciardi, A., Hoopes, M. F., Marchetti, M. P., & Lockwood, J. L. (2013). Progress toward understanding the ecological impacts of nonnative species. *Ecological Monographs*, 83(3), 263–282.
27. Haddad, N. M., Brudvig, L. A., Clobert, J., Davies, K. F., Gonzalez, A., Holt, R. D., Lovejoy, T. E., Sexton, J. O., Austin, M. P., Collins, C. D., Cook, W. M., Damschen, E. I., Ewers, R. M., Foster, B. L., Jenkins, C. N., King, A. J., Laurance, W. F., Levey, D. J., Margules, C. R., & Townshend, J. R. (2015). Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2), e1500052.
28. IUCN. (2022). Guidelines for Using the IUCN Red List Categories and Criteria. Version 15. IUCN.
29. Grozeva, N., Zhiyanski, M., & Sokolovska, M. (2019). Assessment of conservation status of Emerald Network sites in Bulgaria. *Acta Zoologica Bulgarica*, 71(3), 353–365.
30. Petrova, A., Lazarova, M., & Kolev, I. (2021). Standard Data Forms as a tool for biodiversity monitoring in the Emerald Network. *Biodiversity and Conservation*, 30, 1575–1592.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2026, надійшла після рецензування 12.03.2026, прийнята 30.03.2026

The article was received 13.02.2026, received after revision 12.03.2026, accepted 30.03.2026

Магась Наталія Іванівна

к.т.н., доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Адреса робоча: м. Миколаїв, 54007, Проспект Героїв України, 9

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2579-1465> **e-mail:** nataly.magas@gmail.com

Томченко Ольга Володимирівна

к.т.н., старший науковий співробітник ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України»

Адреса робоча: вул. Олеса Гончара, 55-б, м. Київ, 01054, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6975-9099> **e-mail:** olhatomch@gmail.com

Загородня Сніжана Анатоліївна

к.т.н., старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: 0186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4332-4211> **e-mail:** zagorodnya.s@gmail.com

Шевякіна Наталя Анатоліївна

к.т.н., незалежна дослідниця, Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5984-5580> **e-mail:** n.a.sheviakina@gmail.com

УДК 004.9:528.9:338.48:719

Denys Herchuk, Postgraduate Student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-8987-0927> **e-mail:** herchuck.denis@gmail.com

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

CONCEPTUAL MODEL OF A GIS-BASED RECOMMENDATION SYSTEM FOR SUSTAINABLE HERITAGE ROUTES FORMATION

Abstract. The purpose of the study is to substantiate a conceptual model of a GIS-based recommendation system for generating sustainable routes to cultural and natural heritage sites. The relevance of the research is determined by the need to move from recommending separate popular locations to constructing routes that consider user interests, spatial, temporal, thematic, recreational and environmental constraints. The methodology combines system analysis, conceptual modelling, a geographic information approach and multi-criteria evaluation. The article defines the input data of the system: the user profile, characteristics of heritage sites, spatial data, contextual parameters and sustainability criteria. The proposed model includes modules for the user profile, heritage site database, geographic information analysis, context processing, multi-criteria evaluation, route generation and recommendation explanation. The result is a conceptual scheme in which a route is interpreted as a managed information object that should correspond to user interests, spatial and temporal feasibility, thematic coherence and the principles of sustainable territorial use. The scientific novelty lies in integrating personalized preferences, GIS routing logic, thematic coherence of heritage sites and sustainability criteria into a single mechanism for route generation. The theoretical value consists in clarifying the structure of a GIS-based recommendation system for cultural and nature-based tourism. The practical value lies in the possibility of using the model as a basis for a software prototype, a heritage site database and a route ranking algorithm. Further research should focus on formalizing criterion weights, selecting spatial and contextual data sources, developing an experimental dataset and evaluating recommendation quality in real or simulated tourist scenarios.

Keywords: spatial data; tourism planning; points of interest; multi-criteria evaluation; visitor management; personalization.

Д.В. Герчук

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

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ФОРМУВАННЯ СТАЛИХ МАРШРУТІВ ДО ОБ'ЄКТІВ СПАДЩИНИ

Анотація. Мета дослідження полягає в обґрунтуванні концептуальної моделі геоінформаційної рекомендаційної системи для формування сталих маршрутів до об'єктів культурної та природної спадщини. Актуальність роботи зумовлена потребою переходу від рекомендації окремих популярних локацій до побудови маршрутів, що враховують інтереси користувача, просторові, часові, тематичні та рекреаційно-екологічні обмеження.

Методика ґрунтується на системному аналізі, концептуальному моделюванні, геоінформаційному підході та багатокритеріальному оцінюванні. Визначено вхідні дані системи: профіль користувача, характеристики об'єктів спадщини, просторові дані, контекстні параметри та критерії сталості. Запропоновано структуру моделі з модулями профілю користувача, бази об'єктів спадщини, геоінформаційного аналізу, контексту, багатокритеріального оцінювання, формування маршруту та пояснення рекомендації. Результатом є концептуальна схема, у якій маршрут розглядається як керований інформаційний об'єкт, що має відповідати інтересам користувача, просторово-часовій здійсненності, тематичній цілісності та принципам сталого використання територій. Наукова новизна полягає в інтеграції персоналізованих вподобань, геоінформаційної логіки маршрутизації, тематичної зв'язності об'єктів спадщини та критеріїв сталості в єдиний механізм формування маршруту. Теоретичне значення полягає в уточненні структури геоінформаційної рекомендаційної системи для культурно-природного туризму. Практичне значення полягає у можливості використання моделі як основи для створення програмного прототипу, бази об'єктів спадщини та алгоритму ранжування маршрутів. Обмеження дослідження пов'язані з відсутністю експериментальної перевірки прототипу. Подальші дослідження передбачають формалізацію вагових коефіцієнтів, добір просторових даних і перевірку якості рекомендацій.

Ключові слова: просторові дані; туристичне планування; об'єкти інтересу; багатокритеріальне оцінювання; управління відвідувачами; персоналізація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.95-104>

Вступ

У межах дослідження поставлено завдання обґрунтувати концептуальну модель геоінформаційної рекомендаційної системи, яка формує маршрути до об'єктів культурної та природної спадщини не лише за зручністю чи популярністю, а й з урахуванням сталого використання територій. Такий підхід відповідає розумінню сталого туризму як діяльності, що має враховувати поточні й майбутні економічні, соціальні та екологічні наслідки туристичного розвитку [1]. У контексті Цілей сталого розвитку туризм розглядається як інструмент місцевого розвитку, збереження ресурсів і відповідального використання територіального потенціалу [2]. Для об'єктів спадщини маршрут може або сприяти збереженню культурної та природної цінності території, або посилювати перевантаження найбільш відомих місць [3]. Тому формування маршруту доцільно трактувати як інформаційно-аналітичну задачу, у якій рекомендація враховує інтереси відвідувача, рекреаційне навантаження, доступність локацій, часові обмеження, сезонність і можливість перенаправлення потоку до менш перевантажених, але тематично релевантних об'єктів. Маршрутизація також дає змогу впливати на розподіл туристичного потоку без прямого обмеження доступу до спадщини [4]. Культурні маршрути слід розглядати не як просту послідовність пам'яток, а як територіально пов'язану систему матеріальних, нематеріальних, історичних і природних елементів [5]. Європейська практика культурних маршрутів підкреслює мережевий характер такого підходу, де окремі місця об'єднуються спільною темою, історичною пам'яттю, локальною ідентичністю та міжкультурним діалогом [6]. Саме тому наукове завдання статті полягає

в узгодженні персоналізованої рекомендації, геоінформаційного аналізу маршруту та критеріїв сталого управління відвідуванням культурної й природної спадщини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій доцільно розпочати з оглядів туристичних рекомендаційних систем, які засвідчують перехід від загальних переліків привабливих місць до персоналізованого добору туристичних об'єктів [7]. Такі системи поєднують профіль користувача, просторові характеристики, контекст подорожі та очікувану якість туристичного досвіду [8]. Рекомендації об'єктів інтересу спираються на різномірні дані, зокрема характеристики користувача, географічне положення, відгуки, популярність і попередні траєкторії [9]. Персоналізоване планування маршрутів поєднує добір об'єктів із їх оптимальним впорядкуванням у межах часових і просторових обмежень [10]. У теорії рекомендаційних систем виділяються підходи, засновані на змісті об'єктів, подібності користувачів і поєднанні різних джерел інформації [11]. Гібридні рекомендаційні системи важливі для маршрутизації, оскільки туристичний вибір залежить не від одного критерію, а від інтересів, відстані, часу, транспорту, привабливості місця та індивідуальних обмежень [12]. Сучасні узагальнення підкреслюють значення оцінювання якості рекомендацій, взаємодії з користувачем і адаптації алгоритмів до конкретної предметної області [13]. Для туристичних маршрутів принциповим є контекстний вимір, адже доречність локації залежить від часу доби, сезону, місця перебування користувача, тривалості подорожі, завантаженості об'єкта та умов доступу [14]. Також актуальним є врахування прогнозованих подій, зокрема скупчення відвідувачів, транспортних затримок або змін погодних умов [15]. Перспективним для таких задач є поєднання геоінформаційного аналізу з багатокритеріальними методами прийняття рішень, зокрема Fuzzy TOPSIS, що дає змогу узгоджувати вподобання туриста, доступність, безпеку, просторові характеристики та критерії сталого розвитку [16]. Дослідження планування подорожей на основі даних про місцезнаходження доводять, що маршрут є складнішою структурою, ніж окрема рекомендація, оскільки потребує визначення набору місць і логіки їх послідовного відвідування [17]. Приклад поєднання байєсівської мережі, методу аналізу ієрархій та геоінформаційних функцій показує можливість формалізованого зіставлення привабливості, просторової доступності й тематичної відповідності [18]. Важливим доповненням є врахування скупчення відвідувачів, оскільки уникнення надмірно завантажених місць покращує досвід користувача і зменшує тиск на популярні об'єкти [19]. У сфері культурного туризму існують рішення, що поєднують рекомендаційний модуль і планувальник подорожі, однак переважно зосереджуються на персоналізації культурного досвіду та обмеженнях користувача [20]. Поєднання рекомендаційної системи з оптимізацією маршруту для місць культурної спадщини підтверджує продуктивність такого підходу, але питання повної інтеграції критеріїв сталості залишається відкритим [21]. Систематичні огляди культурних маршрутів засвідчують активне використання цифрових технологій в управлінні спадщиною, проте потребують чіткішого зв'язку між даними про об'єкти, тематичною структурою маршруту та поведінкою відвідувачів [22]. Сучасні дослідження тематичних маршрутів культурної спадщини на основі багатоджерельних даних і машинного навчання показують потенціал алгоритмічного формування змістовно пов'язаних траєкторій [23].

Контекстно орієнтовані рекомендаційні системи у сфері культурної спадщини розглядають об'єкт не ізольовано, а у зв'язку з користувачем, ситуацією відвідування, цифровим середовищем і змістом культурного досвіду [24]. Отже, наявні дослідження формують достатню основу для розроблення геоінформаційної рекомендаційної системи, однак недостатньо розкривають комплексне поєднання персоналізованого добору, просторово-часового впорядкування, тематичної цілісності та критеріїв сталого управління туристичним потоком.

Метою дослідження є обґрунтування концептуальної моделі геоінформаційної рекомендаційної системи формування сталих маршрутів до об'єктів культурної та природної спадщини, у якій персоналізовані інтереси користувача, просторові характеристики об'єктів, часові обмеження, тематична узгодженість, доступність локацій і критерії сталого туризму розглядаються як складові єдиного багатокритеріального механізму. Досягнення мети передбачає уточнення предметної області, визначення вхідних даних системи, опис функціональних модулів моделі, формалізацію логіки оцінювання туристичних об'єктів і маршрутів, а також пояснення рекомендації через зручність, відповідність інтересам і внесок маршруту в збалансоване використання культурно-природного потенціалу території.

Методика дослідження

Методика дослідження ґрунтується на поєднанні системного аналізу, концептуального моделювання, геоінформаційного підходу та багатокритеріального оцінювання, оскільки предметом статті є не готовий програмний продукт, а архітектурна й алгоритмічна логіка майбутньої геоінформаційної рекомендаційної системи. Геоінформаційний підхід обрано тому, що у роботі з культурними ресурсами він дає змогу пов'язати об'єкти спадщини з їхнім просторовим положенням, доступністю та управлінськими рішеннями щодо території [25]. Багатокритеріальне оцінювання доцільно застосувати за прикладом дослідження Huang і Bian, де поєднання методу аналізу ієрархій, байєсівської мережі та геоінформаційних функцій дозволило формалізувати персоналізований добір туристичних атракцій за кількома ознаками, а не лише за популярністю [18]. Для побудови логіки рекомендації використано підхід, близький до системи СНІР, у якій рекомендаційний модуль і планувальник подорожі працюють разом для формування персоналізованих маршрутів культурного туризму з урахуванням об'єктів і обмежень користувача [20]. Також враховано приклад планувальника маршрутів для місць культурної спадщини, де поєднання рекомендаційної системи з оптимізацією маршруту показало доцільність переходу від простого добору об'єктів до впорядкованої послідовності відвідування [21]. Контекстний компонент методики обрано за прикладом досліджень рекомендаційних систем у сфері культурної спадщини, де об'єкт розглядається не ізольовано, а у зв'язку з користувачем, ситуацією відвідування та цифровим середовищем [24]. Для посилення тематичної складової маршруту враховано підхід до планування культурних маршрутів із використанням багатоджерельних даних і машинного навчання, що дозволило формувати змістовно пов'язані туристичні траєкторії [23].

Результати дослідження

Запропонована концептуальна модель геоінформаційної рекомендаційної системи призначена для формування персоналізованого сталого маршруту до об'єктів культурної та природної спадщини. Її основна функція полягає не в простому доборі найпопулярніших локацій, а в побудові впорядкованої послідовності об'єктів, яка одночасно відповідає інтересам користувача, просторово-часовим обмеженням, тематичній логіці маршруту та критеріям сталого використання територій. Загальну архітектуру запропонованої системи показано на рис. 1.

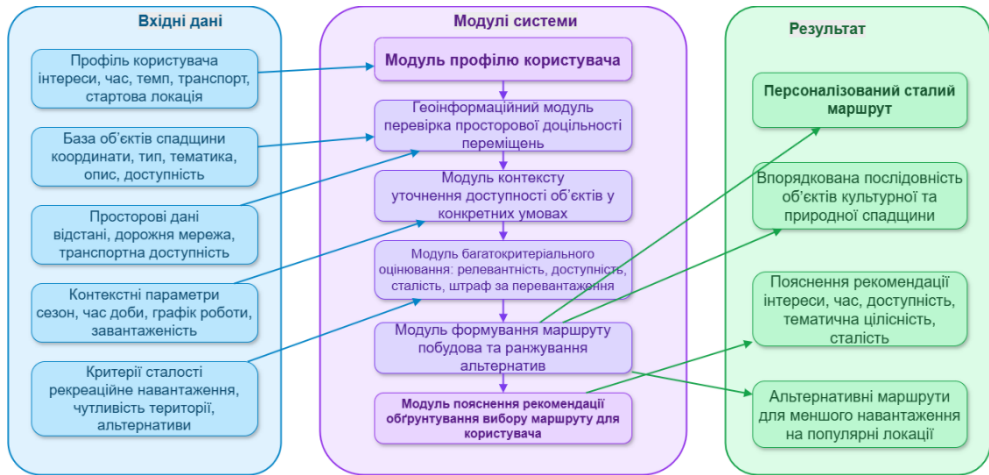


Рис. 1. Архітектура концептуальної моделі геоінформаційної рекомендаційної системи формування сталих маршрутів (побудовано автором)

Вхідними даними моделі є профіль користувача, база об'єктів культурної та природної спадщини, просторові дані, контекстні параметри та критерії сталості. Профіль користувача містить тематичні інтереси, доступний час, бажаний темп подорожі, тип пересування та початкову локацію. База об'єктів спадщини включає координати, тип об'єкта, тематику, опис, орієнтовну тривалість відвідування, рівень доступності та додаткові характеристики. Просторові дані описують відстані між об'єктами, дорожню або пішохідну мережу, транспортну доступність і взаємне розташування локацій. Контекстні параметри враховують сезон, час доби, графік роботи, погодні або організаційні обмеження та потенційну завантаженість об'єктів. Критерії сталості охоплюють рекреаційне навантаження, чутливість території, доцільність відвідування та можливість включення альтернативних менш перевантажених об'єктів.

Обробка даних у моделі відбувається через кілька взаємопов'язаних модулів. Модуль профілю користувача визначає персональні обмеження й інтереси. Геоінформаційний модуль перевіряє просторову доцільність переміщення між об'єктами. Модуль контексту уточнює, чи є об'єкт доступним для відвідування в конкретних умовах. Модуль багатокритеріального оцінювання обчислює інтегральну оцінку кожного об'єкта та маршруту за сукупністю критеріїв: тематична відповідність,

просторова зручність, часова здійсненність, доступність, сталість і штраф за потенційне перевантаження. Модуль формування маршруту будує одну або кілька альтернативних послідовностей об'єктів, після чого модуль пояснення рекомендації показує, чому запропонований маршрут є релевантним, здійсненим і сталим.

Алгоритмічна логіка моделі передбачає послідовний перехід від початкового набору об'єктів до поясненого маршруту. Спочатку система отримує параметри користувача й подорожі, після чого формує набір потенційно релевантних об'єктів. Далі об'єкти фільтруються за просторовими, часовими та організаційними обмеженнями. Після цього для кожного об'єкта розраховується інтегральна оцінка, формується граф можливих переміщень, будуються маршрутні альтернативи, виконується їх ранжування та обирається найкращий варіант.

Результатом роботи моделі є не окремий рекомендований об'єкт, а маршрут як впорядкована система локацій. Такий маршрут має відповідати п'ятьом умовам: бути цікавим для користувача, просторово логічним, здійсненим у межах доступного часу, тематично цілісним і прийнятним з позиції сталого використання культурно-природних ресурсів. Саме така інтеграція персоналізації, геоінформаційного аналізу, тематичної зв'язності та критеріїв сталості становить основну відмінність запропонованої моделі.

Послідовність роботи моделі подано на рис. 2.

По своїй суті запропонована модель спирається на наявні підходи, але поєднує їх у ширшу концептуальну схему. У дослідженні персоналізованого планування маршрутів маршрут розглядається як послідовність об'єктів інтересу, що формується з урахуванням переваг користувача, часу, відстані та інших обмежень [10]. Запропонована модель використовує цю логіку, але доповнює її тематичною цілісністю культурної та природної спадщини й критеріями сталості. У роботі Huang і Bian персоналізована рекомендація туристичних атракцій поєднує онтологію туризму, метод аналізу ієрархій, байєсівську мережу та геоінформаційні функції, що дало змогу формувати рекомендації з урахуванням поведінки користувача й просторового відображення результатів [18]. Запропонована модель зберігає ідею багатокритеріального добору, але переносить її з рівня окремих атракцій на рівень сталого маршруту.

Близьким до запропонованої моделі є підхід GIS-based personalized tourism recommendation, де поєднання геоінформаційних технологій і аналізу асоціативних правил дало змогу враховувати інтереси користувача, просторову близькість, картографічну візуалізацію та потенційно більш збалансований розподіл туристичної активності [26]. Розвиток цього підходу безпосередньо пов'язаний із використанням геоінформаційних технологій у туристичному плануванні, оскільки GIS дає змогу поєднувати просторовий аналіз, оцінювання POI, візуалізацію туристичних ресурсів і підтримку управлінських рішень щодо сталого розвитку дестинацій [27]. Для персоналізованої складової маршрутизації показовим є приклад системи SigTur/E-Destination, у якій геоінформаційні дані поєднуються з онтологічним описом туристичних активностей, профілем користувача, мотиваціями подорожі та механізмами змістової й колаборативної фільтрації [28]. Узагальнення підходів до інтелектуальних туристичних рекомендаційних систем підтверджує, що такі системи можуть не лише рекомендувати окремі

атракції, а й підтримувати планування маршруту, враховувати контекст подорожі, часові обмеження, просторове переміщення та методи штучного інтелекту [29]. Окремого значення для маршрутів до об'єктів культурної та природної спадщини набуває врахування функціональності та рівнів доступності POI, оскільки практична можливість відвідування локації є не менш важливою, ніж її тематична привабливість або популярність [30]. Водночас запропонована модель додатково вводить культурно-природну специфіку об'єктів, тематичну узгодженість маршруту та оцінювання рекреаційного навантаження. Система СНІР демонструє можливість поєднання рекомендаційного модуля й планувальника подорожі для культурного туризму, формуючи персоналізовані маршрути на основі об'єктів інтересу та обмежень користувача [20]. У запропонованій моделі цей підхід розширено за рахунок геоінформаційного модуля, контекстного аналізу та критеріїв сталого використання спадщини.

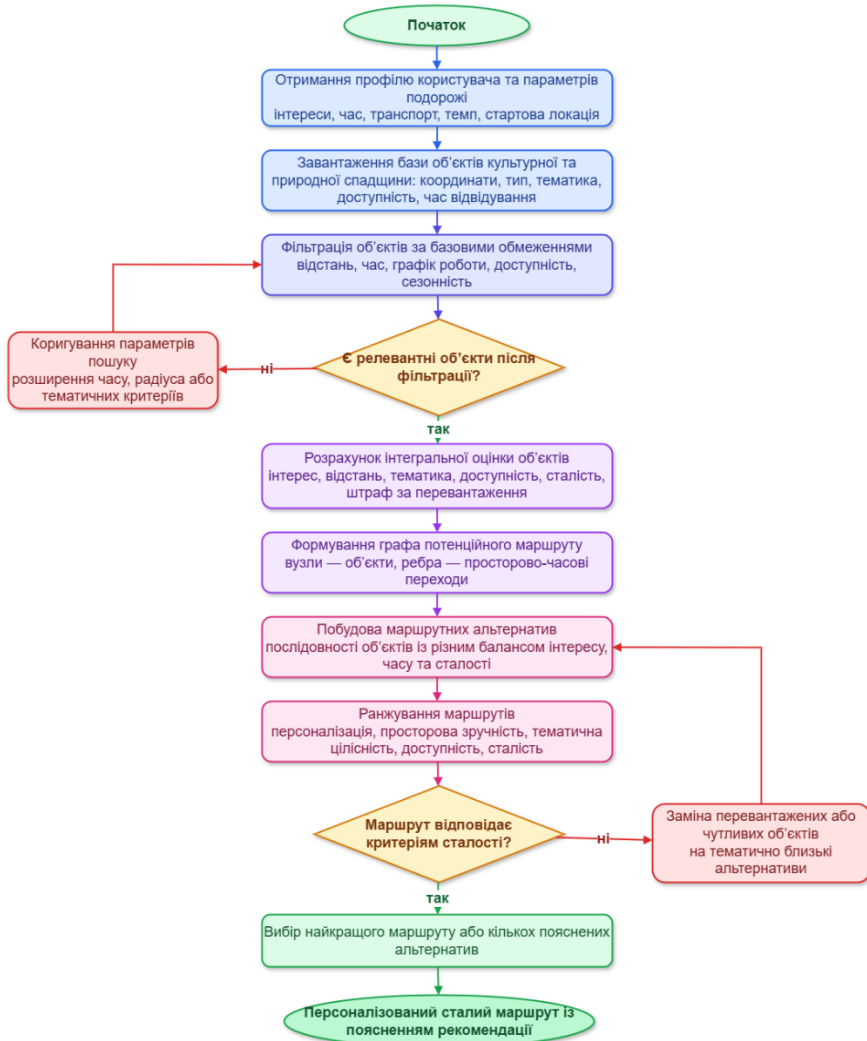


Рис. 2. Блок-схема алгоритму формування персоналізованого сталого маршруту (побудовано автором)

Поєднання рекомендаційної системи з оптимізатором маршруту для відвідування місць культурної спадщини також підтверджує доцільність переходу від списку об'єктів до впорядкованого маршруту; у такому підході маршрут будується з урахуванням переваг користувача, часових меж і кількості відвіданих об'єктів [21]. Запропонована модель відрізняється тим, що до критеріїв вибору додає не лише користувацьку корисність, а й сталість маршруту. У дослідженні тематичних маршрутів культурної спадщини на основі багатоджерельних даних і машинного навчання показано потенціал алгоритмічного формування змістовно пов'язаних туристичних траєкторій [23]. Запропонована модель використовує цей напрям як підставу для врахування тематичної цілісності, але доповнює його просторово-часовою здійсненністю, доступністю об'єктів і зменшенням ризику надмірної концентрації відвідувачів.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті дослідження сформовано концептуальне бачення геоінформаційної рекомендаційної системи, у якій маршрут до об'єктів культурної та природної спадщини розглядається не як технічна послідовність точок, а як керований інформаційний об'єкт із власною просторовою, часовою, тематичною та сталою логікою. Такий підхід дозволяє змістити акцент із рекомендації окремих популярних локацій на формування збалансованого маршруту, що враховує індивідуальний запит користувача та водночас не ігнорує обмеження території, доступність об'єктів і ризик надмірного туристичного навантаження.

Наукова новизна дослідження полягає в обґрунтуванні моделі, де персоналізація, геоінформаційна маршрутизація, тематична цілісність культурно-природної спадщини та критерії сталості поєднані в єдиний механізм багатокритеріального формування маршруту. На відміну від підходів, орієнтованих переважно на інтерес користувача, просторову близькість або оптимізацію часу, запропонована модель вводить сталість як внутрішній критерій рекомендації, а не як зовнішнє пояснення після побудови маршруту. Це відповідає визначеній у концепції статті дослідницькій прогалині, де менш розробленим залишається саме комплексне поєднання вподобань користувача, просторово-часової логіки, тематичної зв'язності та сталого використання ресурсів спадщини.

Теоретичне значення одержаного результату полягає в уточненні структури геоінформаційної рекомендаційної системи для задач культурно-природного туризму. Практичне значення полягає в тому, що запропонована модель може бути використана як основа для подальшого створення програмного прототипу, бази об'єктів спадщини, модуля оцінювання маршрутів і засобів пояснення рекомендацій користувачу. Перспективи подальших досліджень пов'язані з формалізацією вагових коефіцієнтів критеріїв, вибором джерел просторових і контекстних даних, розробленням алгоритму ранжування маршрутів, створенням експериментального набору даних і перевіркою якості рекомендацій на реальних або модельних туристичних сценаріях. Це узгоджується з ідеєю першої постановочної публікації, яка не потребує готового програмного продукту, але має закласти основу для подальшої реалізації прототипу та експериментальної оцінки системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

- [1] UN Tourism. (n.d.). *Sustainable development*. <https://www.untourism.int/sustainable-development>
- [2] United Nations. (n.d.). *Sustainable tourism*. <https://sdgs.un.org/topics/sustainable-tourism>
- [3] UNESCO World Heritage Centre. (n.d.). *Sustainable tourism toolkit*. <https://whc.unesco.org/en/sustainabletourismtoolkit/>
- [4] UNESCO World Heritage Centre. (n.d.). *Managing visitor behaviour (Guide 8)*. UNESCO World Heritage Sustainable Tourism Toolkit. <https://whc.unesco.org/document/198420>
- [5] International Council on Monuments and Sites (ICOMOS). (n.d.). *Charters and doctrinal texts*. <https://www.icomos.org/charters-and-doctrinal-texts/>
- [6] Council of Europe. (n.d.). *Cultural Routes of the Council of Europe programme*. <https://www.coe.int/en/web/cultural-routes/about>
- [7] Solano-Barliza, A., Arregocés-Julio, I., Aarón-Gonzalvez, M., Zamora-Musa, R., De-La-Hoz-Franco, E., Escorcia-Gutierrez, J., & Acosta-Coll, M. (2024). Recommender systems applied to the tourism industry: a literature review. *Cogent Business & Management*, 11(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2367088>
- [8] Sarkar, J. L., Majumder, A., Panigrahi, C. R., Roy, S., & Pati, B. (2022). Tourism recommendation system: a survey and future research directions. *Multimedia Tools and Applications*, 82(6), 8983–9027. <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12167-w>
- [9] Wang, Z., Höpken, W., & Jannach, D. (2025). A survey on point-of-interest recommendations leveraging heterogeneous data. *Information Technology & Tourism*, 27(1), 29–73. <https://doi.org/10.1007/s40558-024-00301-3>
- [10] Halder, S., Lim, K. H., Chan, J., & Zhang, X. (2024). A survey on personalized itinerary recommendation: From optimisation to deep learning. *Applied Soft Computing*, 152, 111200. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.111200>
- [11] Adomavicius, G., & Tuzhilin, A. (2005). Toward the next generation of recommender systems: a survey of the state-of-the-art and possible extensions. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 17(6), 734–749. <https://doi.org/10.1109/tkde.2005.99>
- [12] Burke, R. (2002). Hybrid Recommender Systems: Survey and Experiments. *User Modeling and User-Adapted Interaction*, 12(4), 331–370. <https://doi.org/10.1023/a:1021240730564>
- [13] Ricci, F., Rokach, L., & Shapira, B. (Eds.). (2022). *Recommender Systems Handbook*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-0716-2197-4>
- [14] Adomavicius, G., & Tuzhilin, A. (2010). Context-Aware Recommender Systems. In *Recommender Systems Handbook* (pp. 217–253). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_7
- [15] Li, C., & Zheng, W. (2025). Nipping trouble in the bud: A proactive tourism recommender system. *Information & Management*, 62(1), 104062. <https://doi.org/10.1016/j.im.2024.104062>
- [16] Buasri, N., & Sangpradid, S. (2025). Enhancing tourist experience: a Fuzzy Topsis approach to destination recommendation systems. *GeoJournal of Tourism and Geosites*, 58(1), 233–242. <https://doi.org/10.30892/gtg.58120-1405>
- [17] Lim, K. H., Chan, J., Karunasekera, S., & Leckie, C. (2018). Tour recommendation and trip planning using location-based social media: a survey. *Knowledge and Information Systems*, 60(3), 1247–1275. <https://doi.org/10.1007/s10115-018-1297-4>
- [18] Huang, Y., & Bian, L. (2009). A Bayesian network and analytic hierarchy process based personalized recommendations for tourist attractions over the Internet. *Expert Systems with Applications*, 36(1), 933–943. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.10.019>
- [19] Wang, X., Leckie, C., Chan, J., Lim, K. H., & Vaithianathan, T. (2016). Improving Personalized Trip Recommendation by Avoiding Crowds. In *Proceedings of the 25th ACM International on Conference on Information and Knowledge Management* (pp. 25–34). ACM. CIKM'16: ACM Conference on Information and Knowledge Management. <https://doi.org/10.1145/2983323.2983749>

- [20] Binucci, C., Biondi, G., Di Giacomo, E., Didimo, W., Fortuni, A., & Liotta, G. (2024). *CHIP: A recommender system and a travel planner for cultural tourism*. In *CEUR Workshop Proceedings* (Vol. 3865). https://ceur-ws.org/Vol-3865/12_paper.pdf
- [21] Cardoso, P. J. S., Guerreiro, P., Pereira, J. A. R., & Veiga, R. J. M. (2018). A Route Planner Supported on Recommender Systems Suggestions. In *Proceedings of the 8th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion* (pp. 144–151). ACM. DSAI 2018: 8th International Conference on Software Development and Technologies for Enhancing Accessibility and Fighting Info-exclusion. <https://doi.org/10.1145/3218585.3218660>
- [22] Iakovaki, E., Konstantakis, M., Teneketzis, A., & Konstantakis, G. (2023). Analyzing Cultural Routes and Their Role in Advancing Cultural Heritage Management within Tourism: A Systematic Review with a Focus on the Integration of Digital Technologies. *Encyclopedia*, 3(4), 1509–1522. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia3040108>
- [23] Zou, H., Zhang, G., Sun, C., Landrum, L., Tang, Y., Hu, Y., Cheng, W., & Li, A. (2025). Thematic cultural heritage tourism trail planning integrating multi-source data and machine learning in Wuhan China. *Npj Heritage Science*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s40494-025-02081-3>
- [24] Casillo, M., Colace, F., Conte, D., Lombardi, M., Santaniello, D., & Valentino, C. (2021). Context-aware recommender systems and cultural heritage: a survey. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 14(4), 3109–3127. <https://doi.org/10.1007/s12652-021-03438-9>
- [25] Box, P. (1998). *Geographic information systems and cultural resource management: A manual for heritage site managers*. UNESCO Principal Regional Office for Asia and the Pacific. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000116270>
- [26] Puttinaovarat, S., Chai-Arayalert, S., & Saetang, W. (2026). GIS-Based Personalized Tourism Recommendation Using Association Rule Mining to Support Sustainable Tourism. *Sustainability*, 18(6), 3145. <https://doi.org/10.3390/su18063145>
- [27] Šoltésová, M., Iannaccone, B., Štrba, L., & Sidor, C. (2025). Application of GIS Technologies in Tourism Planning and Sustainable Development: A Case Study of Gelnica. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14(3), 120. <https://doi.org/10.3390/ijgi14030120>
- [28] Moreno, A., Valls, A., Isern, D., Marin, L., & Borràs, J. (2013). SigTur/E-Destination: Ontology-based personalized recommendation of Tourism and Leisure Activities. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1), 633–651. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2012.02.014>
- [29] Borràs, J., Moreno, A., & Valls, A. (2014). Intelligent tourism recommender systems: A survey. *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7370–7389. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.06.007>
- [30] Santos, F., Almeida, A., Martins, C., Gonçalves, R., & Martins, J. (2019). Using POI functionality and accessibility levels for delivering personalized tourism recommendations. *Computers, Environment and Urban Systems*, 77, 101173. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2017.08.007>

Стаття надійшла до редакції 04.02.2026, надійшла після рецензування 17.03.2026, прийнята 10.04.2026

The article was received 04.02.2026, received after revision 17.03.2026, accepted 10.04.2026

Герчук Денис Васильович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-8987-0927> **e-mail:** herchuck.denis@gmail.com

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 534.6:625.7

Artem Maksymenko, Post-Graduate of the Department of Labour and Environmental Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7880-8167> **e-mail:** mksmnkart@gmail.com

Iryna Klimova, Candidate of technical sciences, Docent of the Department of Labour and Environmental Protection
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5591-9952> **e-mail:** irynaklimova63@gmail.com

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

ANALYSIS OF CURRENT SCIENTIFIC RESEARCH ON METHODS OF ASSESSING THE IMPACT OF INDUSTRIAL NOISE ON WORKERS AND ITS NEGATIVE HEALTH EFFECTS

Annotation. The article examines the problem of the impact of industrial noise on workers, the production environment, residents of adjacent territories, and the environment. The relevance of the topic is associated with the growing number of noise sources, industrial development, increasing complexity of technological processes, and the widespread use of high-performance equipment that creates significant noise loads. It has been established that industrial noise is one of the most dangerous factors of the working environment, as it affects not only the human auditory system but also the nervous, cardiovascular, and endocrine systems, reduces work capacity, increases fatigue and stress levels, and raises the risk of occupational injuries. The paper summarizes modern scientific approaches to studying the nature of industrial noise, its physical characteristics, spectral composition, temporal features, and propagation patterns. The main noise sources at industrial enterprises are considered, including mechanical equipment, crushers, presses, hammers, compressors, fans, turbines, conveyors, transformers, metal-cutting machines, ventilation systems, and technological processes such as cutting, grinding, drilling, and welding. It has been determined that most industrial sectors are characterized by noise levels exceeding 85 dB(A), while some technological processes may generate noise above 100 dB(A), creating a high risk of occupational hearing loss. Impulse and low-frequency noise are particularly dangerous because they may cause pronounced vibroacoustic effects on the human body. The article analyzes modern methods of noise impact assessment, including field acoustic measurements, noise exposure assessment, acoustic modeling, GIS technologies, and noise mapping. It is shown that the use of digital models makes it possible not only to identify the most hazardous production areas but also to predict noise propagation and assess the effectiveness of noise protection measures. Considerable attention is paid to the analysis of international and Ukrainian regulatory documents in the field of occupational noise, including International Organization for Standardization ISO 9612:2025, European Union Directive 2003/10/EC, DSN 3.3.6.037-99, and Order №540 of the Ministry of Health of Ukraine. It has been established that modern scientific studies increasingly consider noise as a complex risk factor that affects not only hearing but also psycho-emotional condition, occupational burnout, reaction speed, quality of life, and worker safety. Promising directions for further research include the use of IoT sensors, dynamic noise maps, real-time monitoring systems, and artificial intelligence for predicting noise risks and developing effective noise protection measures.

Key words: industrial noise, noise exposure, acoustic modeling.

А.В. Максименко, І.В. Клімова

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

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЩОДО МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ ПРОМИСЛОВОГО ШУМУ НА ПРАЦІВНИКІВ ТА ЙОГО НЕГАТИВНИХ НАСЛІДКІВ ДЛЯ ЗДОРОВ'Я

Анотація. У статті досліджено проблему впливу промислового шуму на працівників, виробниче середовище, населення прилеглих територій і довкілля. Актуальність теми пов'язана зі зростанням кількості джерел шуму, розвитком промисловості, ускладненням технологічних процесів та поширенням високопродуктивного обладнання, яке створює значне шумове навантаження. Встановлено, що промисловий шум є одним із найбільш небезпечних факторів виробничого середовища, оскільки впливає не лише на слуховий апарат людини, але й на нервову, серцево-судинну та ендокринну системи, знижує працездатність, підвищує рівень втоми, стресу та ризик виробничого травматизму. У роботі узагальнено сучасні наукові підходи до вивчення природи промислового шуму, його фізичних характеристик, спектрального складу, часових особливостей та закономірностей поширення. Розглянуто основні джерела шуму на підприємствах, серед яких механічне обладнання, дробарки, преси, молоти, компресори, вентилятори, турбіни, конвеєри, трансформатори, металообробні верстати, вентиляційні системи та технологічні процеси різання, шліфування, буріння і зварювання. Визначено, що для більшості галузей промисловості характерні рівні шуму понад 85 дБ(А), а окремі технологічні процеси можуть супроводжуватись шумом понад 100 дБ(А), що створює високий ризик професійної втрати слуху. Особливу небезпеку становлять імпульсні та низькочастотні шуми, які можуть викликати виражений віброакустичний вплив на організм людини. У статті проаналізовано сучасні методи оцінювання шумового впливу, зокрема натурні акустичні вимірювання, оцінку шумової експозиції, акустичне моделювання, GIS-технології та побудову шумових карт. Показано, що застосування цифрових моделей дозволяє не лише визначати найбільш небезпечні виробничі ділянки, але й прогнозувати поширення шуму та оцінювати ефективність шумозахисних заходів. Значну увагу приділено аналізу міжнародних та українських нормативних документів у сфері виробничого шуму, зокрема ISO 9612:2025, Директиви 2003/10/ЄС, ДСН 3.3.6.037-99 та наказу МОЗ України №540. Встановлено, що сучасні наукові дослідження дедалі частіше розглядають шум як комплексний фактор ризику, який впливає не лише на слух, але й на психоемоційний стан, рівень професійного вигорання, швидкість реакції, якість життя та безпеку працівників. Перспективними напрямами подальших досліджень визначено використання IoT-сенсорів, динамічних шумових карт, систем реального моніторингу та штучного інтелекту для прогнозування шумових ризиків і розроблення ефективних заходів шумозахисту.

Ключові слова: промисловий шум, шумова експозиція, акустичне моделювання.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.105-116>

Вступ

Промисловий шум є одним із найпоширеніших і найнебезпечніших видів шумового забруднення. Його актуальність пов'язана зі зростанням кількості джерел шуму, розвитком технологій та значним негативним впливом на людей і довкілля. Наслідки промислового шуму проявляються в екологічній, біологічній та соціально-економічній сферах.

За результатами Шостого Європейського опитування умов праці, у 2015 році близько 28% працівників у країнах Європи регулярно працювали в умовах надмірного шуму [1]. Найбільшому ризику піддаються працівники гірничодобувної, металургійної, машинобудівної, будівельної галузей, а також сфер водопостачання та переробки сировини. Шум впливає не лише на працівників, а й на людей, які перебувають поруч із промисловими об'єктами.

Для України проблема є особливо актуальною через значну кількість підприємств важкої промисловості. За даними статистики, понад половина працівників працюють в умовах впливу шуму, а частина з них — при перевищенні допустимих норм [2].

Тривалий вплив шуму призводить до погіршення слуху, порушень роботи нервової та серцево-судинної систем, підвищеної втоми та розвитку професійних захворювань. Особливо небезпечним є постійний шум понад 85 дБ(А), який може викликати втрату слуху вже через кілька років роботи [3].

Промисловий шум також знижує уважність і працездатність працівників, підвищує ризик помилок, аварій та виробничого травматизму. Для підприємств це означає додаткові витрати на лікування, компенсації, втрату продуктивності та плинність кадрів.

Окремою проблемою є вплив шуму на навколишнє середовище. Промислові об'єкти формують зони акустичного забруднення, де рівень шуму перевищує допустимі норми. Це особливо небезпечно для житлових районів, навчальних і медичних закладів. Постійний шум погіршує якість життя населення, сприяє стресу та розвитку хронічних захворювань.

Тому проблема промислового шуму потребує комплексного вирішення: зниження шуму від обладнання, удосконалення технологій, проведення акустичного моніторингу та розроблення державних програм оцінки і прогнозування шумового забруднення.

Метою цього аналітичного огляду є вивчення, узагальнення та критичний аналіз наукових досліджень, присвячених впливу шуму від промислових об'єктів і обладнання на довкілля, здоров'я людини, працездатність та психоемоційний стан працівників. Огляд спрямований на визначення сучасних підходів до оцінки шумового забруднення, виявлення основних тенденцій та наукових прогалин.

Об'єктом дослідження виступає промисловий шум як комплексний фізико-акустичний і гігієнічний фактор виробничого середовища, що формує ризики для здоров'я, працездатності та безпеки працівників, а також впливає на довкілля і населення прилеглих територій.

Предмет дослідження: теоретико-методичні засади, інструментарій та сучасні підходи до оцінювання впливу промислового шуму (включаючи акустичні вимірювання, оцінку шумової експозиції, математичне та GIS-моделювання), а також закономірності його фізичного поширення і медико-біологічної дії на організм людини.

Активний розвиток промисловості й технологій робить проблему шумового забруднення дедалі актуальнішою. Високий рівень шуму на підприємствах негативно впливає на слух, нервову, серцево-судинну та ендокринну системи людини, викликає втому, стрес і зниження продуктивності праці. Крім того, шум поширюється за межі підприємств, впливаючи на мешканців прилеглих територій і природні екосистеми. Тому узагальнення сучасних досліджень є важливим для розроблення ефективних заходів шумового контролю.

Основними завданнями огляду є аналіз джерел промислового шуму, його фізичних характеристик і особливостей поширення; систематизація методів акустичних вимірювань, математичного моделювання та створення шумових карт; узагальнення даних про вплив шуму на здоров'я, увагу, швидкість реакції та безпеку праці; порівняння українських і міжнародних нормативів; аналіз технічних та організаційних заходів зниження шуму, а також визначення малодосліджених напрямів, зокрема впливу низькочастотного шуму.

Очікується, що результати огляду дадуть цілісне уявлення про сучасний стан проблеми промислового шуму, дозволять визначити ефективні способи його зниження та стануть основою для подальших досліджень.

Критерії відбору джерел

Для забезпечення наукової обґрунтованості аналітичного огляду було визначено систему критеріїв, за якими здійснювався добір і подальший аналіз наукових джерел. Використання цих критеріїв дало змогу сформулювати вибірку праць, що найбільш повно відображають сучасний стан досліджень проблеми впливу промислового шуму на людину, виробниче середовище та довкілля.

Першим і основним критерієм була тематична відповідність джерел темі дослідження. До огляду включались лише ті роботи, які безпосередньо стосуються негативного впливу шуму від промислових об'єктів і інженерного обладнання. Особлива увага приділялась працям, у яких розглядалися джерела виникнення шуму, його фізичні характеристики, закономірності поширення, методи вимірювання та оцінювання, а також питання впливу шуму на здоров'я людини, працездатність і стан навколишнього середовища. Крім того, враховувались дослідження, присвячені способам зниження шуму та підвищенню ефективності шумозахисних заходів.

Другим важливим критерієм була наукова достовірність і якість джерел. Для аналізу використовувались статті з фахових наукових журналів, монографії, нормативні документи, стандарти, звіти міжнародних організацій, зокрема ВООЗ, ISO та установ Європейського Союзу, а також матеріали наукових конференцій. Перевага надавалась джерелам, які мають високу наукову цінність, містять перевірені дані та ґрунтуються на чітко описаній методології дослідження. Популярні, рекламні та ненаукові публікації не включались до аналізу.

Важливим критерієм був також хронологічний аспект. Основна увага приділялась працям, опублікованим у період з 2010 по 2026 рік, оскільки саме вони відображають сучасний рівень розвитку науки, нові підходи до оцінки шуму та сучасні технології шумозниження. Водночас у деяких випадках використовувались і більш ранні дослідження, якщо вони мають фундаментальне значення та є основою для сучасних наукових підходів.

Для забезпечення об'єктивності та повноти аналізу враховувалась географічна репрезентативність джерел. До огляду були включені як українські, так і зарубіжні наукові праці. Це дозволило порівняти підходи до оцінки промислового шуму, методи його контролю, вимоги нормативних документів і практику реалізації шумозахисних заходів у різних країнах.

Окрема увага приділялась повноті представленої інформації. До аналізу включались лише ті роботи, які містили повні результати досліджень, дані акустичних вимірювань, таблиці, графіки, схеми, результати моделювання та обґрунтовані висновки. Короткі тези, анотації або публікації без детального опису методики не використовувались, оскільки вони не дають можливості повноцінно оцінити достовірність отриманих результатів.

Ще одним критерієм був рівень практичної значущості наукових робіт. Перевага надавалась дослідженням, результати яких можуть бути використані для вдосконалення умов праці, підвищення рівня промислової безпеки, проектування шумозахисних заходів, оптимізації технологічних процесів та зменшення негативного впливу шуму на працівників і населення.

Природа та джерела промислового шуму

У фізичному розумінні шум є сукупністю небажаних звуків різної частоти та інтенсивності, що мають хаотичний характер і не несуть корисної інформації. Біологічний вплив шуму на людину залежить від його інтенсивності, частоти, тривалості та спектральних характеристик [4].

Основними джерелами промислового шуму є механічне обладнання, аеродинамічні системи, електромеханічні пристрої та технологічні процеси. До механічних джерел належать преси, дробарки, молоти, конвеєри, підшипникові та зубчасті механізми. Аеродинамічний шум створюють вентилятори, компресори, турбіни, вентиляційні системи та пневмотранспорт. Електромагнітні та електромеханічні джерела включають трансформатори, електродвигуни та частотні перетворювачі. Значний шум також виникає під час різання, шліфування, буріння, зварювання, плазмового різання, завантажувально-розвантажувальних операцій і вибухових робіт.

У багатьох галузях промисловості рівень шуму часто перевищує допустимі значення. Для металургійних, машинобудівних, деревообробних і гірничодобувних підприємств характерні рівні 85–90 дБ(А), а окремі технологічні процеси можуть створювати шум понад 100 дБ(А) [5-7]. Особливо небезпечними є імпульсні шуми від вибухів, ударних пресів або стрільби, рівень яких може перевищувати 130 дБ(С).

За часовими характеристиками промисловий шум поділяється на постійний і непостійний. Постійний шум майже не змінюється протягом робочої зміни, тоді як непостійний може коливатися більш ніж на 5 дБ. До непостійних шумів належать мінливі, імпульсні та переривчасті. Мінливий шум поступово змінюється в часі, імпульсний складається з короткочасних звукових сигналів, а переривчастий має періоди ослаблення або повного зникнення звуку.

Важливе значення має спектральна характеристика шуму, тобто розподіл рівнів звукового тиску за частотами. Для оцінки шуму використовують октавні смуги частот від 31,5 до 8000 Гц. За характером спектра шум поділяється на широкосмуговий і тональний. Широкосмуговий шум охоплює великий

діапазон частот без виражених піків і сприймається як рівномірний фон. Його прикладом є шум вентиляційного обладнання. Тональний шум характеризується переважанням окремих частот і сприймається людиною як більш дратівливий. Він характерний для трансформаторів, електродвигунів, компресорів і різних сигнальних пристроїв.

У сучасних виробничих умовах одне обладнання часто поєднує кілька видів шуму. Наприклад, чілерна установка може створювати одночасно тональний шум від компресора і широко смуговий шум від вентиляторів. Для більшості механічних процесів характерний середньо- та високочастотний шум, який найбільше впливає на слух людини. Великогабаритне обладнання, турбіни та компресорні системи частіше генерують низькочастотний шум, який викликає віброакустичний вплив на організм [8].

Сучасні дослідження також показують, що промисловий шум часто поєднується з іншими шкідливими факторами, такими як пил, хімічні речовини, вібрація, висока температура та психоемоційне напруження. Поєднання шуму з пилом або шкідливими речовинами може посилювати ризик втрати слуху, розвитку респіраторних захворювань та інших порушень здоров'я.

Отже, промисловий шум характеризується високою інтенсивністю, складною структурою та значним різноманіттям джерел. Його вплив на людину залежить не лише від рівня шуму, а й від частоти, тривалості дії та поєднання з іншими виробничими факторами.

Методи оцінювання впливу шуму на працівників

До основних підходів оцінки впливу промислового шуму на працівників належать натурні акустичні вимірювання, оцінка шумового навантаження та акустичне моделювання.

Натурні акустичні вимірювання дозволяють визначити фактичні параметри шуму на робочих місцях, зокрема рівні звукового тиску, спектральний склад, пікові значення та тривалість впливу. Такі вимірювання є основою для подальшої оцінки умов праці та відповідності шуму нормативним вимогам.

Отримані результати вимірювань використовуються для оцінки шумового навантаження та можливого ризику для здоров'я працівників. Для цього фактичні показники порівнюють із санітарними нормами, визначають ризик втрати слуху, а також оцінюють вплив шуму на працездатність, увагу та безпеку праці.

Важливим сучасним методом є акустичне моделювання. Його перевага полягає в тому, що воно дозволяє не лише фіксувати поточний акустичний стан виробничого середовища, а й прогнозувати рівні шуму, аналізувати поширення звуку в приміщеннях та оцінювати ефективність шумозахисних заходів. На відміну від натурних вимірювань, акустичне моделювання дає змогу створити повну просторову картину шумового поля з урахуванням характеристик джерел шуму, геометрії приміщень та акустичних властивостей поверхонь.

Норми у сфері оцінки впливу промислового шуму на працівників

Перед аналізом наукових робіт доцільно розглянути міжнародні та українські нормативні документи у сфері оцінки впливу промислового шуму на працівників, оскільки саме вони є основою для більшості досліджень. Наукові роботи переважно спираються на встановлені стандарти вимірювання шуму, методи оцінки шумової експозиції та допустимі рівні шумового навантаження.

Міжнародним стандартом, який регламентує оцінку професійного шуму, є ISO 9612:2025 «Акустика. Визначення впливу професійного шуму. Методологія» [9]. Для країн Європейського Союзу аналогічну роль виконує Європейський Парламент та Директива 2003/10/ЄС [10], яка встановлює мінімальні вимоги до охорони праці та безпеки працівників при впливі шуму.

В Україні основним нормативним документом є ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» [11]. Саме цей документ визначає допустимі рівні шуму, класифікацію шуму та методи його гігієнічної оцінки. Додатково використовуються положення наказу №540 Міністерства охорони здоров'я України [12], у якому встановлено граничні та робочі значення шумового впливу на робочому місці.

Варто зазначити, що в Україні також діє ДСТУ ISO 9612:2022, який фактично є адаптованим перекладом міжнародного стандарту ISO 9612, тому окремо його зазвичай не аналізують.

ISO 9612:2025 має добровільний характер, але вважається основною міжнародною методикою для вимірювання та оцінки шумової експозиції працівників. Під шумовою експозицією розуміють рівень впливу шуму на людину протягом певного часу, найчастіше протягом робочої зміни. Стандарт визначає порядок проведення вимірювань, вибір стратегії оцінки, способи обчислення добового або тижневого рівня шумового навантаження, але не встановлює допустимих меж шуму.

ДСН 3.3.6.037-99, на відміну від ISO, має обов'язковий характер і визначає конкретні допустимі рівні шуму, інфразвуку та ультразвуку на робочих місцях. Якщо рівні шуму перевищують нормативні значення, умови праці вважаються шкідливими або небезпечними. Документ також містить класифікацію шуму, методи його вимірювання та принципи розрахунку шумової дози.

Директива 2003/10/ЄС є обов'язковою для держав-членів Європейського Союзу. Вона вимагає від роботодавців оцінювати рівень шуму на робочих місцях, проводити вимірювання та вживати заходів для зниження ризику впливу шуму. У документі визначені нижні та верхні порогові значення шумової експозиції, після досягнення яких роботодавець зобов'язаний впроваджувати засоби захисту працівників.

Метою ISO 9612:2025 є уніфікація процесу вимірювання та оцінки шумового навантаження. Стандарт застосовується для дослідження шумового впливу на робочих місцях, проведення епідеміологічних досліджень, оцінки ризику втрати слуху та вибору ефективних заходів шумозахисту.

ДСН 3.3.6.037-99 використовується для всіх виробничих приміщень і відкритих промислових майданчиків, де працівники піддаються впливу шуму. Документ не лише встановлює допустимі рівні шуму, а й описує способи вимірювання та оцінки шумового навантаження.

Основною метою Директиви 2003/10/ЄС є визначення мінімальних вимог з охорони праці щодо шуму в усіх сферах діяльності. Документ орієнтований не лише на вимірювання шуму, а й на обов'язкове впровадження організаційних і технічних заходів для зменшення його негативного впливу.

Аналіз наукових досліджень

Аналіз наукових досліджень показує, що проблема впливу промислового шуму на працівників залишається актуальною для більшості галузей промисловості. Значна частина робіт присвячена вивченню ризику втрати слуху, однак сучасні дослідження все частіше розглядають шум як комплексний фактор, що впливає не лише на слуховий апарат, а й на працездатність, рівень стресу, психоемоційний стан та якість життя працівників.

Одним із найбільш системних наукових досліджень є [13], у якому узагальнено результати великої кількості епідеміологічних та експериментальних робіт щодо професійної втрати слуху через шум. Автори встановили стійкий зв'язок між рівнем шуму, тривалістю його впливу та ступенем погіршення слуху. Особливо небезпечним виявився шум понад 85 дБ(А), який значно підвищує ризик втрати слуху. Водночас важливо, що дослідники звернули увагу на кумулятивний характер дії шуму: найбільш швидке погіршення слуху відбувається протягом перших 10–15 років професійної діяльності. Перевагою роботи є велике охоплення різних галузей, однак через відмінності в методиках вимірювань і аудіометрії результати окремих досліджень важко безпосередньо порівнювати.

Подібну тематику продовжує наукова робота [14], у якій узагальнено сучасні дослідження щодо механізмів втрати слуху через вплив шуму. Автори підкреслюють, що професійна приглухуватість є однією з найпоширеніших патологій у світі, а розвиток втрати слуху залежить не лише від рівня шуму, але й від генетичних факторів, супутнього впливу вібрації, токсичних речовин та віку працівника. Важливою перевагою цієї роботи є використання сучасних молекулярно-генетичних та нейрофізіологічних підходів, однак значна частина представлених результатів отримана на тваринах, що обмежує можливість їх прямого перенесення на людину.

Сучасні дослідження дедалі частіше розглядають шум не лише як причину втрати слуху, а і як фактор погіршення загального стану працівників. В [15] було досліджено зв'язок між хронічним впливом шуму та професійним вигоранням серед працівників фармацевтичних підприємств. Було встановлено, що навіть за відсутності клінічно підтвердженої втрати слуху працівники шумних зон мають вищий рівень виснаження та нижчі показники якості життя. Подібні результати отримали в роботі [16], які довели, що навіть рівні шуму нижче допустимих меж, приблизно 70–80 дБА, можуть негативно впливати на продуктивність праці, рівень стресу та слухові пороги працівників. Це свідчить про те, що чинні нормативні межі не завжди гарантують повну безпеку для здоров'я.

Важливий напрям сучасних досліджень пов'язаний із побудовою шумових карт і просторовим аналізом шуму. В роботі [17] було побудовано GIS-карту шуму для мідно-золотодобувного підприємства в Індонезії. Було визначено, що найбільш небезпечними зонами є ділянки біля дробарок і насосного

обладнання, де рівні шуму досягали 88–97 дБА. Подібні результати були отримані в [18] на підприємстві з виробництва бетонних блоків, де побудова шумових карт дозволила виявити найбільш небезпечні виробничі ділянки та розробити заходи профілактики втрати слуху.

Окремий блок досліджень присвячений аналізу шуму від конкретних типів обладнання. У роботі [19] було встановлено, що серед металорізальних верстатів найбільш небезпечними є радіально-свердлувальні, які створюють високі рівні шуму в усьому діапазоні частот. Також було визначено, що найбільші перевищення нормативів характерні для середніх і високих частот 500–4000 Гц, які найбільше впливають на слух і нервову систему. Подібні результати були отримані у роботі [20], де досліджувався шум від металообробних верстатів, і підтвердили, що багато видів обладнання працюють на межі або вище допустимих значень.

У сучасних роботах все більше уваги приділяється не лише фіксації рівнів шуму, а й розробці методів його зниження. У роботі [21] було запропоновано конструкцію звукоізоляційної панелі, яка поєднує звукопоглинання та звукоізоляцію і може бути ефективною як для високочастотного, так і для низькочастотного шуму. У науковому дослідженні [22] було розроблено комплексну систему управління шумом на гумовому виробництві, яка поєднує IoT-сенсори, шумові карти, оцінку ризиків та економічний аналіз заходів шумозахисту. Автори наголошують, що проактивний підхід до управління шумом є більш ефективним, ніж традиційне використання лише індивідуальних засобів захисту.

Ще більш перспективний напрям представлений у роботах [23] та [24]. Автори пропонують використовувати динамічні шумові карти, системи позиціонування працівників та математичну оптимізацію маршрутів пересування для зменшення шумового навантаження.

Окремо варто відзначити дослідження [25], у якому поєднано результати акустичних вимірювань із суб'єктивними оцінками працівників. Було встановлено, що шум у виробничому цеху досягав 92 дБА, а індивідуальна добова шумова експозиція працівників становила 85–89 дБА. Працівники повідомляли про втому, труднощі спілкування, головний біль, стрес і дзвін у вухах. Моделювання показало, що встановлення звукопоглинаючої стелі може знизити шум приблизно на 5–6 дБА.

Загалом сучасні наукові дослідження підтверджують, що промисловий шум є комплексним фактором ризику, який впливає не лише на слух, а й на серцево-судинну систему, психоемоційний стан, продуктивність праці та якість життя. Водночас значна частина досліджень має певні обмеження: короткий період спостереження, невеликі вибірки, недостатній аналіз спектрального складу шуму, відсутність довготривалих медичних спостережень та обмежене врахування супутніх факторів, таких як вібрація, пил, хімічні речовини та позавиробничий шум.

Найбільш перспективними напрямками подальших досліджень є розроблення динамічних шумових карт, використання IoT-сенсорів і систем реального моніторингу, застосування штучного інтелекту для прогнозування шумових ризиків, а також створення комплексних моделей, які поєднуюватимуть фізичні, медико-біологічні та соціально-економічні аспекти впливу промислового шуму.

Висновок

Проблема впливу промислового шуму на працівників залишається однією з найактуальніших у сфері охорони праці, екології та акустики. Попри тривалий період досліджень, питання шумової експозиції не втрачає значення через зростання інтенсивності виробничих процесів, ускладнення технологічного обладнання та активне використання високопродуктивних машин і механізмів.

Наукові дослідження показують, що промисловий шум є не лише фізичним фактором виробничого середовища, а й складним чинником стресу, який комплексно впливає на організм людини. Навіть рівні шуму, що не викликають явного погіршення слуху, можуть призводити до зниження працездатності, підвищеної втоми, погіршення уваги та функціональних змін в організмі.

Значна кількість наукових робіт присвячена дослідженню джерел промислового шуму та їх спектральних характеристик. Встановлено, що різні галузі промисловості формують власні шумові профілі, які відрізняються рівнями звукового тиску, частотними характеристиками, імпульсністю та тривалістю впливу. Це ускладнює створення універсальних підходів до оцінки шуму та потребує розроблення спеціалізованих методик для окремих галузей.

Отже, сучасний стан досліджень свідчить про наявність значного обсягу знань щодо механізмів дії промислового шуму та його наслідків. Водночас залишаються невирішені питання, серед яких недостатня інтеграція фізичних, медико-біологічних і соціально-економічних аспектів, обмежена кількість довготривалих досліджень та потреба у створенні комплексних моделей оцінки ризиків. Це підтверджує необхідність подальших досліджень, спрямованих на глибше вивчення впливу шуму на здоров'я та працездатність працівників, а також на розроблення ефективних заходів його зниження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Parent-Thirion, A., Biletta, I., Cabrita, J., Vargas, O., Vermeylen, G., Wilczynska, A., & Wilkens, M. (2016). *Sixth European Working Conditions Survey: Overview report*. Publications Office of the European Union.
2. State Statistics Service of Ukraine. (2020). *Labour of Ukraine in 2019*. August Trade LLC. [Державна служба статистики України. (2020). Праця України у 2019. Київ : ТОВ «Август Трейд»].
3. Basanets, A. V., Shydlovska, T. A., & Hvozdetyskiy, V. A. (2014). The problem of diagnosing occupational sensorineural hearing loss in Ukraine. *Ukrainian Journal of Occupational Health Problems*, 4(41). (in Ukrainian) [Басанець А. В., Шидловська Т. А., Гвоздецький В. А. (2014). Проблема діагностики професійної сенсоневральної приглухуватості в Україні. *Український журнал з проблем медицини праці*, 4(41)].
4. Basner, M., Babisch, W., Davis, A., Brink, M., Clark, C., Janssen, S., & Stansfeld, S. (2014). Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, 383(9925), 1325–1332.
5. Neitzel, R., & Seixas, N. (2005). The effectiveness of hearing protection among construction workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 2, 227–238.
6. Suter, A. L. (2002). Construction noise: Exposure, effects, and the potential for remediation. *AIHA Journal*, 63, 768–789.
7. McBride, D. I. (2004). Noise-induced hearing loss and hearing conservation in mining. *Occupational Medicine*, 54(5), 290–296.
- 8.

9. Leventhall, G. (2004). Low frequency noise and annoyance. *Noise & Health*, 6(23), 59–72.
10. International Organization for Standardization. (2025). *Acoustics — Determination of occupational noise exposure — Methodology (ISO 9612:2025)*.
11. European Parliament, & Council of the European Union. (2003, February 6). *Directive 2003/10/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise)*. *Official Journal of the European Union*, L 42, 38–44.
12. Verkhovna Rada of Ukraine. (1999, December 1). *On approval of the state sanitary norms of industrial noise, ultrasound and infrasound: Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 37*. [Верховна Рада України. Про затвердження Державних санітарних норм виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : наказ МОЗ України від 01.12.1999 № 37].
13. Ministry of Health of Ukraine. (2023, March 23). *On approval of the limit and action values of noise exposure in the workplace: Order No. 540*. Registered with the Ministry of Justice of Ukraine on April 7, 2023, under No. 593/39649. [Міністерство охорони здоров'я України. Про затвердження Граничних та робочих значень шумового впливу на робочому місці : наказ від 23.03.2023 № 540. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 07.04.2023 за № 593/39649].
14. Lie, A., et al. (2015). Occupational noise exposure and hearing: A systematic review. *International Archives of Occupational and Environmental Health*.
15. Reddy, R., & Fredriksson, S. (2025). Noise-induced hearing loss: 2020–2022 research highlights. *Hearing Journal*, 78(6).
16. Karaikos, C., Vlastos, I., Farantos, G., Rachiotis, G., Simou, E., & Dounias, G. (2025). Chronic noise exposure with normal hearing is related to adverse quality of life and burnout. *European Scientific Journal*, 21(37), 1–14.
17. Gedik Toker, Ö., Tas Elibol, N., Kuru, E., Görmezoğlu, Z., Görener, A., & Toker, K. (2025). Industrial noise: Impacts on workers' health and performance below permissible limits. *BMC Public Health*, 25, Article 1615.
18. Susanto, A., Setyawan, D. O., Setiabudi, F., Savira, Y. M., Listiarini, A., Putro, E. K., Muhamad, A. F., Wilmot, J. C., Zulfakar, D., Kara, P., Shofwati, I., Sodikin, S., & Tejamaya, M. (2021). GIS-based mapping of noise from mechanized minerals ore processing industry. *Noise Mapping*, 8, 1–15.
19. Ahmed, S. S., & Gadelmoula, A. M. (2020). Industrial noise monitoring using noise mapping technique: A case study on a concrete block-making factory. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
20. Rieznik, D. V. (2023). Experimental studies of noise pollution in machining areas. *News of the Donetsk Mining Institute*, 2(53), 60–70. (in Ukrainian) [Резнік Д. В. (2023). Експериментальні дослідження шумового забруднення механообробних дільниць. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 2(53), 60–70].
21. Józwick, J., Wac-Włodarczyk, A., Michałowska, J., & Kłoczko, M. (2018). Monitoring of the noise emitted by machine tools in industrial conditions. *Journal of Ecological Engineering*, 19(1), 83–93.
22. Lapshyn, O., Lapshyn, O., & Khudyk, M. (2025). Occupational noise protection in workshops with operating equipment. *Journal of Kryvyi Rih National University*, 23(2), 10–18.
23. Aldossary, M., Alghamdi, A., & Alotaibi, F. (2025). Workplace noise management in rubber manufacturing: Monitoring, mapping and control strategies. *Sustainability*, 17, Article 1181.
24. Borkowski, B., Czajka, I., Pluta, M., & Suder-Dębska, K. (2016). The conceptual design of dynamic acoustic maps to assess noise exposure. *Polish Journal of Environmental Studies*, 25(4), 1415–1420.
25. Reis, D., Miranda, J., Reis, J., & Duarte, M. (2022). Optimization system to minimize exposure to occupational noise. *Archives of Acoustics*, 47(1), 15–23.

26. van Dort, P. (2025). Acoustic measurements and employee feedback: Addressing noise in industrial work environments – A case study. In *Forum Acusticum Euronoise 2025: Proceedings of the 11th Convention of the European Acoustics Association* (pp. 1969–1975). Málaga, Spain.

Стаття надійшла до редакції 21.01.2026, надійшла після рецензування 09.03.2026, прийнята 24.03.2026

The article was received 21.01.2026, received after revision 09.03.2026, accepted 24.03.2026

Максименко Артем Віталійович

аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7880-8167> **e-mail:** mksmnkart@gmail.com

Клімова Ірина Володимирівна

кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва і архітектури

Адреса робоча: пр. Повітрофлотський, 31, м. Київ, Україна, 03037

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5591-9952> **e-mail:** irynaklimova63@gmail.com

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

UDC 004.855:681.518

Oleksandr Trofymchuk¹, Corresponding Member of the NASU, Dr. Sc., Professor, Director of the Institute of Telecommunications and Global Information Space
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** Trofymchuk@nas.gov.ua

Petro Bidyuk², Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Mathematical Methods of System Analysis at the NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7421-3565> **e-mail:** pbidyuke_00@ukr.net

Oxana Tymoshchuk², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, the Department of Mathematical Methods of System Analysis at the NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-3095> **e-mail:** oxana_tim@gmail.com

Vira Huskova², PhD (Engineering), Associate Professor, the Department of Mathematical Methods of System Analysis at the NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7637-201X> **e-mail:** guskovavera2009@gmail.com

Arsen Kroptya², Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, the Department of Mathematical Methods of System Analysis at the NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1740-3837> **e-mail:** feodorit@ukr.net

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

FINANCIAL RISK ANALYSIS IN MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS

Abstract. *A new approach is proposed for modeling the interdependence among factors of multivariate risks, represented as matrices of interdependence measures for numerical description and a family of copulas with parameter estimates for analytical description. The approach proposed to construct a multivariate risk model in which, marginal distributions are modeled separately using elliptical distributions for measurements at the center of the samples and extreme distributions in the tails, while the dependencies between risks are modeled by copulas. The joint distribution is modeled using marginal distributions and copulas and can be applied to the analysis of risk characteristics. An approach to determining risk dependencies using the concept of mutual information within the framework of Bayesian networks has been developed. A computational experiment involving two generated, theoretically well-known three-dimensional distributions and one empirical three-dimensional distribution for exchange rates demonstrated the applicability of the proposed approach to modeling multidimensional risk.*

The problem of identifying the optimal portfolio structure under active risk management and asset liquidity constraints, a multidimensional model for estimating tail risk measures is proposed. A computational experiment conducted to estimate risk measures by generating a sample yielded an estimation error of less than one percent for non-extreme quantiles. The quality of the estimation of risk deviation measures requires further refinement of the model. The quality of risk measure estimates for the tail regions of distributions indicates that the model based on a combination of marginal distributions using normal and Pareto distributions needs to be improved to describe central observations.

Keywords: *system analysis, financial risks, multidimensional distribution, copula families, joint distribution, dependency measures, combined marginal distribution.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.117-134>

Introduction

Financial risk management remains an important problem for modern economic and financial systems, especially under conditions of non-stationary and nonlinear processes [1–3]. Effective risk analysis requires not only estimation of separate risks but also consideration of dependencies between multiple risk factors. Interaction between factors in high-dimensional systems may significantly increase total losses and complicate the process of risk estimation and decision-making [4, 5].

The behavior of financial positions depends on numerous exogenous and endogenous factors related to market conditions, economic sectors, and internal market dynamics [6]. As the number of factors increases, the probability of extreme events and heavy-tailed distributions also grows. Traditional low-dimensional models based on several principal factors remain popular due to their simplicity; however, they are often insufficient for describing complex dependency structures in large-scale systems [7].

To analyze dependencies between financial instruments, this study applies approaches based on random matrix theory and dependency measures. Previous studies demonstrated that empirical correlation matrices contain dominant eigenvalues that differ from the theoretical spectra of random matrices, indicating the existence of meaningful latent market factors [9–13]. Such analysis makes it possible to separate informative dependencies from noise and improve multivariate risk modeling.

Because the traditional linear correlation coefficient has limitations in describing nonlinear and tail dependencies, this work considers alternative dependency measures and copula-based approaches for modeling multivariate financial risks. The proposed methodology combines dependency analysis, multivariate distributions, and numerical simulation methods to support practical risk estimation and portfolio analysis in multidimensional financial systems.

Problem statement

The study is aiming to solving the following problems:

- to formulate systemic approach to analysis of risks for multivariate portfolio;
- determine appropriate dependency measures and the limits of their application to estimation the risk factors in numerical form;
- application of random matrices theory to studying the properties of dependency measures;

- to analyze the possibility of application the distributions of correlation matrices eigenvalues for different dependency measures and distributions of distances between the eigenvalues aiming to determine the number of principal factors in a model;
- to formulate the method for estimation risk characteristics using combined multivariate model and illustrate practical application of the method.

Material

Dependency measures. First, consider the very notion of dependency for random variables. Independent are random variables, $X_1, \dots, X_n$, for which the following equality is true:

$$P(X_1 \leq x_1; \dots; X_n \leq x_n) = P(X_1 \leq x_1) \cdot \dots \cdot P(X_n \leq x_n). \quad (1)$$

It means that the knowledge regarding one of the variables does not provide new knowledge about others. The dependency is inverse characteristic but the possibilities of its formulation can differ dependently on the problem statement.

The dependency measure should be symmetric and universal, i.e. applicable to any pair of continuous or discrete random variables, X and Y that characterize risks [15]. If dependence between risk factors does not exist the dependency measure should be equal zero, it should be restricted by the values $[-1; 1]$, and reach minimum and maximum values when random variables are respectively, oppositely monotonic and congruent monotonic. Linear correlation completely characterizes dependency between normally distributed random values that model central part of combined distribution of risk. That is why any dependency measure should be expressed through Pearson coefficient of linear correlation in a case of two-dimensional normal distribution.

The dependency measure used in the models of financial and economic risks should be invariant with respect to continuous strictly increasing transforms and indicate to availability of differences between random variables as well as to be a measure of distance. If the distance measure has all mentioned properties it is called metrics of dependency.

Linear correlation. Linear correlation is most widely used dependency measure that is used in modeling multivariate economic and financial risks with the use of elliptical distributions, for example, normal and Student t -distribution. The coefficient of linear correlation between two random variables, X and Y , having finite standard deviations is computed via the expression:

$$\rho(X, Y) = \frac{E[XY] - E[X]E[Y]}{\sqrt{\sigma^2[X]\sigma^2[Y]}}, \quad (2)$$

where, $\sigma[X]$ and $\sigma[Y]$ are standard deviation of X and Y , respectively.

The coefficient of linear correlation is not metric of dependency. Because of usage of heavy tail distributions (and respectively infinite standard deviation) for which the measure (1) has not been determined, the linear correlation coefficient is not determined for all types of random values. This coefficient is invariant to strictly increasing linear transforms but in general case it is not invariant to nonlinear strictly

increasing transforms. The coefficient of linear correlation is commutative, $\rho(X, Y) = \rho(Y, X)$ and restricted, $-1 \leq \rho(X, Y) \leq 1$; where equality is reached in a case of complete linear dependency of random values. Completely dependent random values can show correlation coefficient distinct from 1 or, -1. For independent random values the equality is true: $\rho(X, Y) = 0$, however, from $\rho(X, Y) = 0$ does not follow independence of linked to them risks (for example, in the case of normally distributed X and completely depending from it risk X^2). The correlation coefficient does not provide for description of dependency between risks, especially in tails of a distribution (Fig. 1).

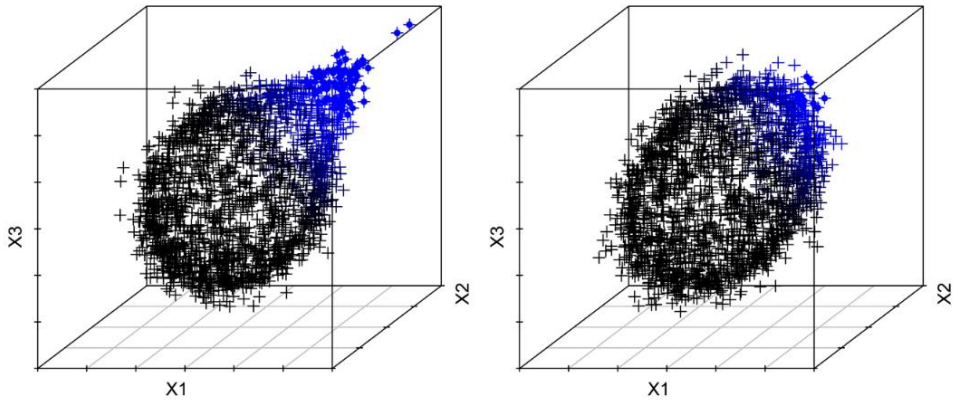


Fig. 1. Multivariate observations with similar normal marginal distributions and the same correlation coefficients, $\rho = 0.14$, but with different dependency structures

Concordance measures. Concordance of risks and corresponding variables means a tendency to simultaneous increasing or decreasing their values. The observations, (x_i, y_i) and (x_j, y_j) of the random values vector, (X, Y) , are considered to be in concordance if, $x_i < x_j, y_i < y_j$ or $x_i > x_j, y_i > y_j$. The conditions of concordance for observations can be also written as follows: $(x_i - x_j)(y_i - y_j) > 0$; respectively, the condition of non-concordance is as follows: $(x_i - x_j)(y_i - y_j) < 0$. The coefficient of Kendall rank correlation, τ , and coefficient of rank Spearman correlation, ρ_s , are numerical measures of dependence that are linked to concordance measures. The concordance measure, τ , for samples of two random variables, X and Y , is determined as a difference between the number of pairs of two-dimensional observations that in concordance and the number of pairs that are not in concordance, divided by the total number of two-dimensional observation pairs.

If (X', Y') and (X'', Y'') are independent random vectors with similar distribution functions, then concordance measure Kendall, τ , is computed via the expression:

$$\tau = P[(X' - X'')(Y' - Y'') > 0] - P[(X' - X'')(Y' - Y'') < 0]. \quad (3)$$

Under increasing transforms of ψ, ϕ and with $X' \geq X''$ the following inequality is true: $\psi(X') \geq \psi(X'')$; and in analogy, with $Y' \geq Y''$ the following condition is true: $\phi(Y') \geq \phi(Y'')$. Thus, the Kendall, τ , is invariant to increasing transforms.

For two-dimensional normal distribution and for any random variables having dependency structure described by elliptical copula, the Kendall τ has an expression linking it with coefficient of linear correlation, ρ , as follows:

$$\tau = \frac{2}{\pi} \arcsin(\rho). \quad (4)$$

The Spearman rank correlation, ρ_s , is also supported by the notion of concordance and non-concordance. However, this measure also takes into consideration marginal distributions of random variables. Let, (X', Y') , (X'', Y'') and (X''', Y''') , are independent random vectors with similar functions of joint distributions; then the Spearman concordance measure, ρ_s , is defined as follows:

$$\rho_s = P[(X' - X'')(Y' - Y'') > 0] - P[(X' - X'')(Y' - Y'') < 0]. \quad (5)$$

In the same way this measure of dependency can be determined using another component of the third vector, X''' . The coefficient of rank Spearman correlation is linked to the coefficient of linear Pearson correlation, ρ , as follows:

$$\rho_s = \frac{E(FG) - 1/4}{1/12} = \frac{E[FG] - E[F]E[G]}{\sqrt{\sigma^2[F]\sigma^2[G]}} = \rho(F, G), \quad (6)$$

where, F and G are marginal distribution functions of random variables X and Y , respectively.

The rank correlation coefficients, τ and, ρ_s , are commutative: $\tau(X, Y) = \tau(Y, X)$, $\rho_s(X, Y) = \rho_s(Y, X)$. For independent random variables, $\tau(X, Y) = \rho_s(X, Y) = 0$. The values of the both coefficients of rank correlation belong to the range: $[-1, 1]$. These two concordance measures can be expressed via copula. This approach provides the possibility for using as numerical measure of dependence the concordance measures, Kendall, τ , and Spearman, ρ_s , in cases where traditionally is used linear correlation coefficient. In these cases it is also possible to remove the restrictions regarding normal or elliptical joint distribution.

Matrices of correlation coefficients. Consider the problem of determining the form of numerical description of dependency between more than two random variables. The dependency measure characterizes dependency structure between two random variables using one number. To model the risk of an organization the dependency measure is generalized for the case of, $N > 2$ (risks), i. e. the matrix, $N \times N$, of pairwise dependency measures is considered. Here empirical matrix of linear correlations is a key part of a model for computing the Value-at-Risk (VaR) measure for risks with normal distributions. According to Markowitz portfolio theory optimal portfolio corresponds to small eigenvalues of correlation matrix [18].

VaR estimation for portfolio with normal distribution. To find risk measure VaR for normal distribution of risk factors at given confidence level and known portfolio cost it is necessary to compute standard deviation of return rate:

$$VaR = \alpha \sigma P_0. \quad (7)$$

At the first step it is determined portfolio return rate, R_p , that is linear function of return rates of its components:

$$R_p = \sum_{i=1}^N \omega_i R_i, \quad (8)$$

where, N is number of portfolio components; R_i is return rate for i -th component; $w_i = P_i/P_p$ is weighting coefficient for i -th component; where, P_p is portfolio cost; P_i is cost of i th portfolio component. The matrix form of portfolio return rate is as follows:

$$R_p = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N] \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_N \end{bmatrix}. \quad (9)$$

For the vector of weighting coefficients, w , and vector of return rates, R , we have: $R_p = w^T R$. The next step is determining standard deviation for return, σ_p . Normal distribution of linear sum of normal random values gives normal distribution for the portfolio return rate, R_p . Thus, expected return rate is determined as follows: $\mu_p = \sum_{i=1}^N w_i \mu_i$, and variance of the rate has the expression:

$$\sigma_p^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_i \omega_j \sigma_{ij} = \sum_{i=1}^N \omega_i^2 \sigma_i^2 + 2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j < i}^N \omega_i \omega_j \sigma_{ij}, \quad (10)$$

where, σ_{ij} are elements of covariance matrix.

Properties of empirical correlation matrices. The correlation matrix is widely used in theoretical studies but in systems of risk management its estimate is used in the form of empirical correlation matrix. The model of averaged correlation in which all element are equal, ρ , but for the “1s” on main diagonal, there exists one large eigenvalue, $\lambda_1 = 1 + (N - 1)\rho$, and all others eigenvalues are equal to, $\lambda_{i \geq 1} = 1 - \rho$. Similar result was found in the case when non-diagonal elements of correlation matrix are random values with mathematical expectation, ρ , and standard deviation, σ :

$$E[\lambda_1] = (N - 1)\rho + \frac{\sigma^2}{\rho} + 1 + o(1). \quad (11)$$

Thus, when, $\rho > 0$, maximum eigenvalue is increasing with increasing system dimensionality, N . To the dominating eigenvalue corresponds uniformly distributed on components eigenvector, $v_1(1/\sqrt{N})$. This vector has economic sense as a factor of influence on all risk positions or generalized market index. The factor can be used to explain large scale market crises. Such interpretation can be found in the studies of empirical financial correlation matrices [12, 19].

The study [19] on empirical matrices of linear correlation for 406 stock rates in the period of 1991-1996 showed correspondence between distribution of eigenvalues to theoretical results from the theory of random matrices, but for 6% of maximum eigenvalues. The work [10] points out to availability of concentration of particularly large eigenvalues for random symmetric matrices. In practice of computing experiments it was observed availability of several eigenvalues in the range that exceeds for about 5-10 times the basic bulk of eigenvalues. This situation can be explained by availability in the market besides basic generalized market factor other factors, say sector factors that influence some positions.

The study [7] proposed the group model of fund markets. According to the model assumptions the market includes several separate groups that use assets the prices of which correlate with prices of other assets of this group. In this situation the

correlation matrix becomes close to the block-diagonal form where each block corresponds to the sector of economy with higher correlations in the frames of the block and lower correlations outside of the block. Close to this case is correlation matrix with, $N_1 \times N_1$, diagonal blocks, in the frames of which the correlation coefficients are equal, ρ_1 , with “1s” on diagonal, and ρ_0 , outside of the blocks. Then maximum eigenvalue of the correlation matrix is estimated as follows:

$$\lambda_1 = 1 + (N_1 - 1)\rho_1 + (N - N_1)\rho_0, \quad (12)$$

the eigenvalues that correspond to the eigenvectors that characterize principal factors influencing the branch of economy can be found as follows:

$$\lambda_1 = 1 + (N_1 - 1)\rho_1 + (N - N_1)\rho_0, \quad (13)$$

and other eigenvalues can be found as follows:

$$\lambda_{i=\frac{N}{N_1}+1\dots N} = 1 - \rho_1. \quad (14)$$

The matrices of correlation coefficients that include (but for coefficient of linear correlation because of its drawbacks regarding risk management) the concordance measures, were studied with the methods of random matrix theory [13]. It was pointed out in [12] to correspondence of results received for random symmetric matrix to distribution of distances between eigenvalues of empirical matrix of linear correlation for 1000 stocks of American companies for two-year period.

The matrices of Pearson, Kendall, and Spearman correlation coefficients are symmetric and that is why the case of maximum statistical independence was considered corresponding to the symmetry condition. The deviations from foresights of the random matrix theory indicate to existence of dependences characteristic for a specific system.

Methods

Numerical modeling using copulas. The complex structure of multivariate risk distributions makes direct analytical estimation of risk measures difficult. Therefore, numerical simulation methods, particularly Monte Carlo simulation, are used to estimate risk measures and perform scenario analysis.

In the proposed approach, marginal distributions describe the behavior of individual risk factors, while copulas define the dependency structure between them. This allows the model to generate multivariate samples that preserve both individual characteristics of risks and their joint behavior.

The generated samples are then used to estimate portfolio risk measures and analyze possible scenarios of market behavior. Such an approach is especially useful when dependencies between risk factors are nonlinear or become stronger in the tails of distributions.

In the multivariate case, sample generation can be performed either sequentially for each variable or directly for the whole multivariate distribution. The second approach is more suitable for modeling complex dependency structures, since it allows the joint behavior of all risk factors to be considered simultaneously.

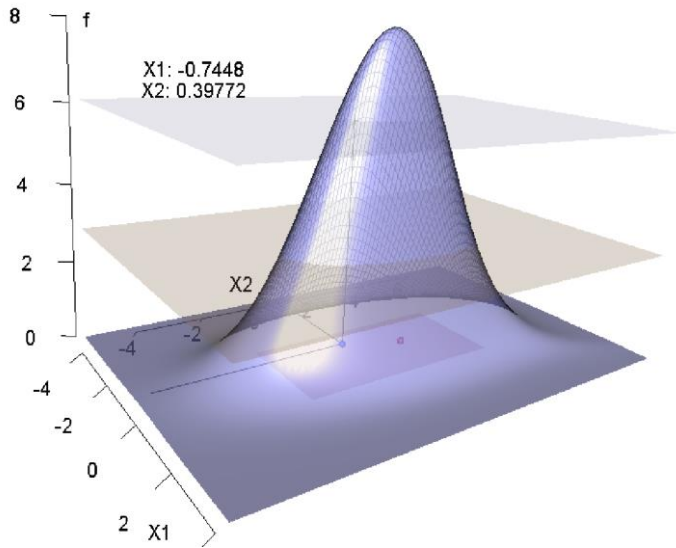


Fig. 2. Multivariate generalization of the generating method using cross-section

Application of models to actual data. Modeling of joint probabilistic distribution of risk factors was performed for simulated three-dimensional distributions of Cauchy, Student, normal, and exchange rate of currencies (with 15 min observation interval): EUR, CHF, GBP with respect to USD from 2009 to 2016. For each dataset was performed estimation of Archimedean copulas from the families: Gumball, Clayton, Frank and elliptical copulas from the Student family and normal distribution.

Together with estimates of marginal distributions this experiment provided the possibility for modeling the functions of joint distribution. Figs. 3–7 illustrate joint distributions for the currency exchange rates modeled with the use of various dependency structures.

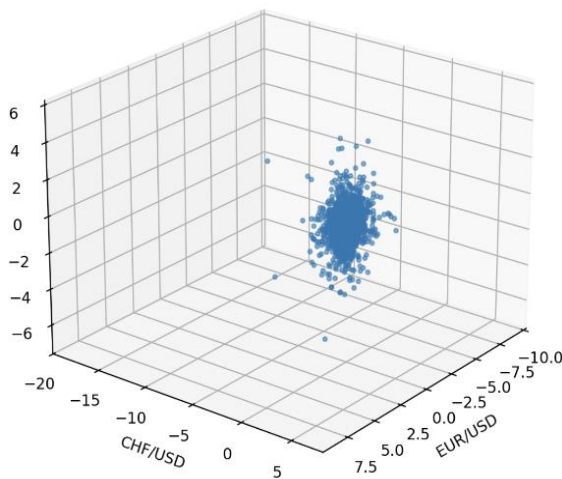


Fig. 3. Joint distribution on the basis of normal copula

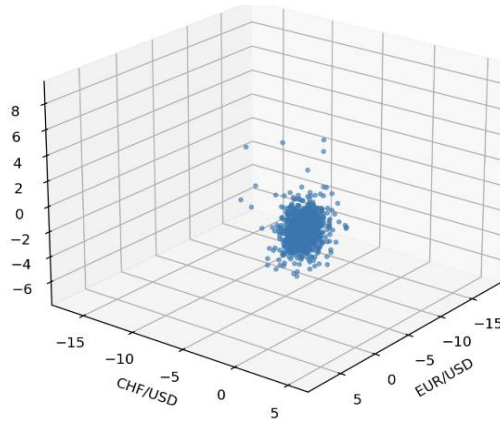


Fig. 4. Joint distribution on the basis of *t*-Student copula

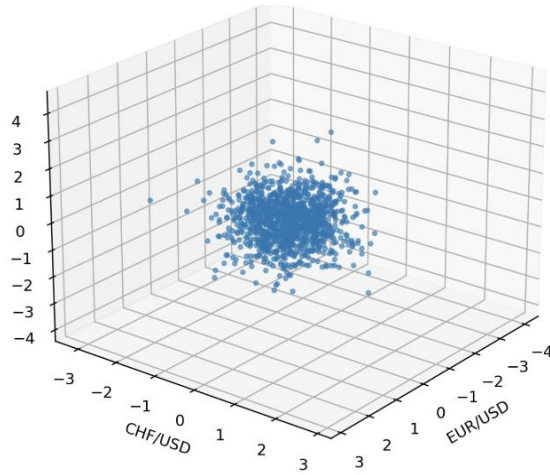


Fig. 5. Joint distribution on the basis of Frank copula

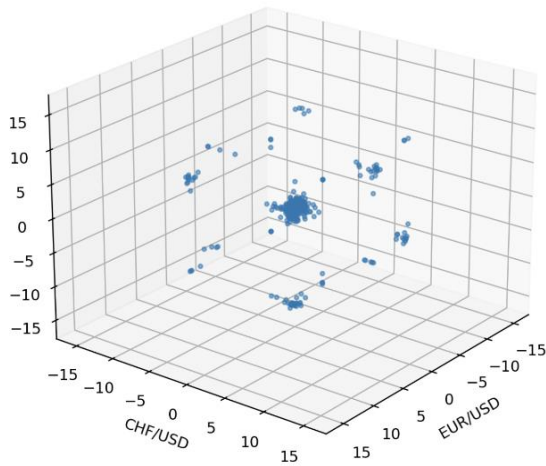


Fig. 6. Joint distribution on the basis of Gumball copula

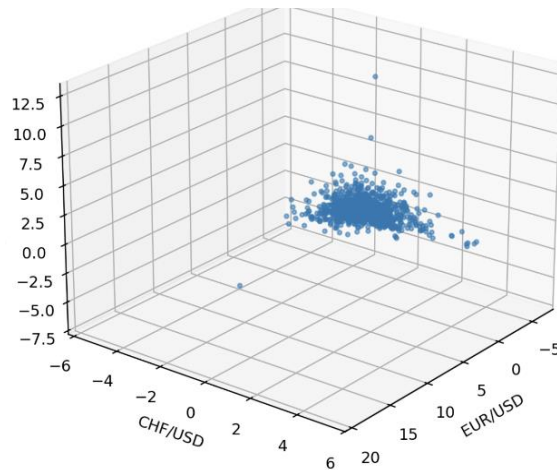


Fig. 7. Joint distribution on the basis of Clayton copula

Empirical joint distribution for the currencies mentioned is shown in Fig. 8.

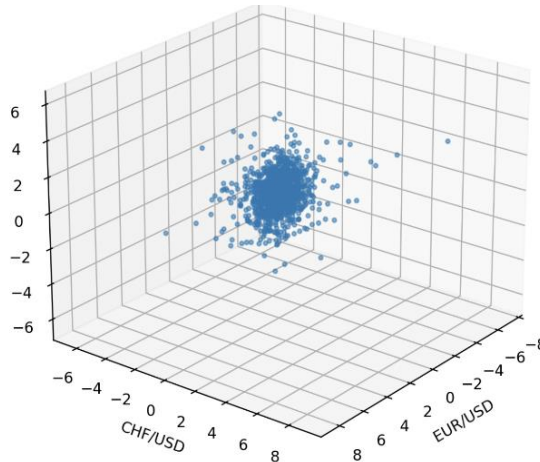


Fig. 8. Empirical joint distribution the currencies exchange rate

Results

The quantitative measures of risk based on risk measures and qualitative based upon scenario analysis provide researchers and risk managers with the integral picture regarding level of risk of available positions and portfolios [26]. An active risk management (control) requires constructing models that would allow to measure risk and determine its acceptability for organization as well as establish the level of risk by changing the structure of portfolio.

Estimation of risk through the market cost should also take into consideration the liquidity risk. This component comes to being through impossibility to sell an asset at definite moment using its market value. The liquidity risk is available on almost all financial and commodity markets. On the markets with low volumes of trading and during financial crisis the liquidity share reaches, 25%-30%. Volatility of liquidity imposes its restrictions on possible changes of portfolio structure during

active phase of risk control. An active risk control requires develop the approach that would allow optimize with respect to estimates of risk measures the portfolio structure under restrictions of liquidity with respect to separate portfolio positions.

To solve the problem of active control for portfolio risks it was proposed to use the probabilistic-statistical model on the basis of combined distribution from normal and generalized Pareto distribution, marginal distributions of separate positions and multivariate distributions of portfolio loss. The multivariate distributions of loss are constructed by linking marginal distributions using special link functions in the form of copulas, and estimating risk measures related to tails and central parts of distributions.

The problem of finding optimal portfolio structure with respect to the VaR measure can be considered as the problem of optimizing estimate of VaR measure using the model with restrictions that reflect volatility of market liquidity. To estimate risk measures using the generated from the model of multivariate sample the cost of separate positions were found corresponding values of portfolio cost. If $\{X_{i,j}\}$ is sample of costs for, n -dimensional portfolio, and reordered in the way that, $X_{1:n} \leq \dots \leq X_{n:n}$, then empirical estimate of VaR is the following:

$$VaR_{\alpha}(X) = X_{\max(i \in N | i \leq n\alpha):n^*} . \quad (15)$$

In the computing experiment were used daily exchange rates of Swiss franc, GB pound, Japanese yen and USD with respect to euro for nine years. Power of the sample was 1643 observations after preliminary data processing. The parameters of one-dimensional marginal distributions for each currency and copula parameters were estimated using the method of maximum likelihood.

Table 1. Estimates of copula parameters

Copula	Parameter	Value	MSE
Gumball	θ	1.6720	0.0158
Normal	ρ_1	0.5637	0.0118
	ρ_2	0.3318	0.0136
	ρ_3	0.5943	0.0120
	ρ_4	0.8241	0.0054
	ρ_5	0.8593	0.0051
	ρ_6	0.8037	0.0061
Frank	β	4.5874	0.0911

Empirical estimate of risk measure VaR with quintile, 0.03, i.e. for 50 observations that exceed the threshold is 3.497. For quintile, 0.01, i.e. for 16 observations that exceed the threshold the measure is 3.535. For quintile 0.03 there is enough observations to have a possibility for use of empirical estimate; for quintile, 0.01 the sample is too short and there is necessity to model risk distribution and estimation of risk with the model.

Table 2. Estimates of the risk measure VaR

Copula	Quintile	Power of sample		
		100	1000	10000
Gumball	0,03	3,4140	3,4770	3,4896
	0,01	3,4375	3,5665	3,6008
Normal	0,03	3,5006	3,5386	3,5346
	0,01	3,6177	3,6880	3,6603
Frank	0,03	3,4986	3,4797	3,4959
	0,01	3,5139	3,5632	3,5892

According to Table 2 the estimates of VaR measure using the models based upon combined marginal distributions and linked to joint distribution with the Gumball and Frank copulas have an error of about, 0.203%, and 0.022%, with respect to the empirical value for quintile, 0.03. The model with normal copula has an error of about, 1%. The results achieved provide the possibility for making conclusion that all three models are adequate and have possibility for their practical application. Thus, an estimate of the risk measure VaR can be considered 3.5892 for quintile 0.01. The same three models were used for estimating coherent risk measure ES (Expected Shortfall).

Table 3. Estimates of the risk measure ES

Copula	Quintile	Power of sample		
		100	1000	10000
Gumball	0.03	3.5121	3.5752	3.5835
	0.01	3.5348	3.6479	3.6737
Normal	0.03	3.6104	3.6475	3.6438
	0.01	3.7124	3.7733	3.7523
Frank	0.03	3.5857	3.5662	3.5836
	0.01	3.6017	3.6548	3.6822

Empirical estimate of ES with quintile 0.03 is 3.6074. The estimates in Table 3 show that the most adequate model for estimating this measure of risk is the model with Frank copula. Thus the model estimate for ES with quintile 0.01 is 3.682.

All three models showed worse results for the Markowitz deviation measure comparing to the empirical result. The models proposed are also used for active risk control through changing portfolio structure to optimize selected measure of risk.

Table 4. Estimates of the Markowitz risk measure

Copula	σ_+
Gumball	0.1330
Normal	0.1462
Frank	0.1370
Empirical estimate	0.1733

The constructed four-dimensional probabilistic distribution model was used to develop active risk control methodology by finding optimal portfolio structure on the basis of selected tail risk measure VaR. Fig. 9 illustrates the values of VaR estimates for various relationships between portfolio positions and liquidity restrictions that allowed for changings in positions of Swiss franc and GB pounds.

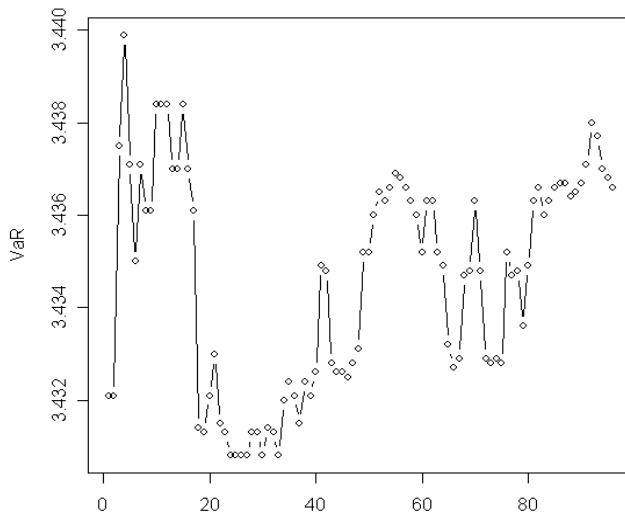


Fig. 9. An estimate of risk measure VaR depending on relation between positions in Swiss franc and GB pounds (accepted as 1); with step 0.1

It was also established that the values of tail risk measures for multivariate models of financial data exhibit nonlinear character with multiple local extremes depending on the portfolio structure. This character of dependency requires development effective optimization algorithm.

Table 5 demonstrates that empirical correlation matrices contain several dominant eigenvalues that substantially exceed the remaining part of the spectrum. These eigenvalues indicate the presence of key latent factors that determine the dependency structure of the analyzed financial instruments. The similarity of results for Kendall, Pearson and Spearman measures confirms the stability of the detected dependency pattern. At the same time, the remaining eigenvalues are close to the random-matrix range, which makes it possible to separate meaningful risk factors from noise.

Table 5. Maximum eigenvalues of empirical correlation matrices

Name	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4
Kendall	236,2	60,4	24,4	14,8
Pearson	318,7	69,6	16,6	12,5
Spearmen	313,4	70,0	17,7	13,0

For example, for the matrix of linear correlations, $\lambda_{max} = 8.847487$, and four maximum eigenvalues are: 318.7, 69.6, 16.6 and 12.5, other 480 eigenvalues are positive and less than 1.02.

For empirical correlation matrices was estimated empirical distribution of distances between eigenvalues expanded with Gaussian unfolding and theoretical distribution of distances for corresponding symmetric random matrix from (5). The empirical distributions for correlation matrices and theoretical distributions for random matrices turned out to be similar for majority of eigenvalues except for maximum eigenvalue of empirical correlation matrix which turned out to be substantially larger than proposes theoretical distribution.

For linear correlation it corresponds to the level of about, 99.9992%. In right tail of distribution theoretical threshold for 95% of observations exceed 5% of eigenvalues; and the threshold of 97% exceed 2.7% of eigenvalues (Fig. 10).

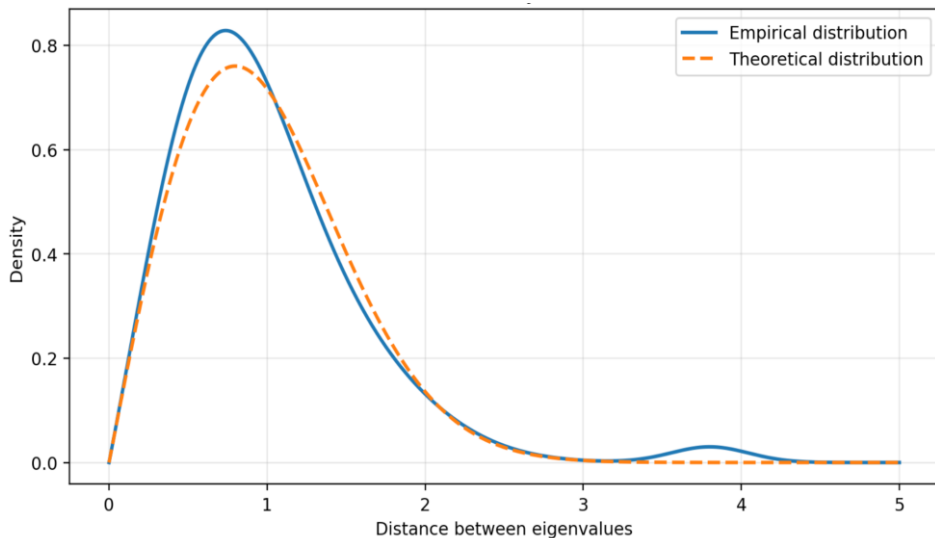


Fig. 10. Empirical density distribution of distances between eigenvalues of empirical matrix of linear Pearson correlation coefficients and theoretical density of distances distribution

The distributions of eigenvalues and distances between eigenvalues for empirical correlation matrices and different dependency measures used in the experiment demonstrate similar behavior. The eigenvalue distributions provide the possibilities for determining the number of basic factors in the model.

Discussion

The number of risk factors in large scale financial systems can be very high, and that is why the problem of multivariate risk analysis attracts attention of scientists, engineers and risk managers the world over. Interaction and simultaneous influence of multiple risk factors in high-dimension systems can result in substantial increase of total loss comparing to the cases when interaction between elements of the systems is taken into consideration.

The main task of the studies is to identify principal factors making substantial influence on the value of possible loss. The theory of random matrices provides the possibilities for analysis of eigenvalues distribution regarding correlation matrices of dependency measures. The results of various studies show that this is the possibility for receiving practically useful information to be further used in management of multivariate risks. It is possible to carry out the studies in the future directed to improvement of the results using theoretical distributions of eigenvalues and distances between eigenvalues for symmetric positively defined matrices. Also has perspective analysis of an influence of non-linear strictly increasing transforms on distribution of eigenvalues of dependency measures for empirical matrices.

Conclusions

The proposed system-analysis approach enables modeling dependencies between risk factors using matrices of dependency measures and copula families with estimated parameters. This makes it possible to construct a multivariate risk model in which marginal distributions and dependency structures are modeled separately. Methods for estimating copula parameters were considered, including a two-step maximum likelihood procedure for joint distribution modeling. The results confirm that this approach can be applied to practical risk management tasks and scenario analysis. The study also used mutual information within a Bayesian network framework to determine risk dependencies and account for expert knowledge and new information during risk management. The analysis of Pearson, Kendall and Spearman correlation matrices showed that dominant eigenvalues exceed theoretical random-matrix limits. This indicates the presence of key latent factors, while smaller eigenvalues mainly correspond to noise. Therefore, portfolio optimization based on Markowitz theory should be performed after filtering noisy data. Computational experiments with generated and empirical three-dimensional distributions confirmed the applicability of the proposed approach to multivariate risk modeling. For tail risk estimation, the proposed model supported portfolio structure optimization under liquidity constraints. The estimation error for non-extreme quantiles was less than one percent, while tail and deviation risk measures require further model improvement.

REFERENCES

1. Jorion, P. (2003). *Financial Risk Manager Handbook* New Jersey: Wiley.
2. Bidjuk, P., Timoshchuk, O., Gus'kova, V., Prosjankina-Zharova, T. & Levenchuk, L. (2025). *Analiz nestacionarnih ta nelinejnih procesiv v ekonomici ta finansah*. Kiïv: KPI im. Igorja Sikors'kogo (in Ukrainian). URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77009>
3. Fenton, N., Neil, M. (2013). *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks*. Boca Raton, FL: CRC Press.

4. Turban, E. & Aronson, J. E. (2001). Decision support systems. New Jersey: Prentice Hall.
5. Dovgij, S. O., Bidjuk, P. I. & Trofimchuk, O. M. (2014). Sistemi pidtrimki prijnattja rishen' na osnovi statistichno-jmovirnisnih metodiv. Kiiv: Logos. (in Ukrainian). URL: <https://nvd-nanu.org.ua/en/c852c5e1-c193-1c64-fb13-67b818323660/>
6. Malevergne, Y. & Sornette, D. (2004). Collective origin of the coexistence of apparent RMT noise and factors in large sample correlation matrices. "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", 331, 3-4, 660-668. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.09.004>
7. Noh, J. (2000). A model for correlations in stock markets. "Physical Review E", 61, 5981-5982. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.5981>
8. Fama E. & French K. (1996). Multifactor explanations of asset pricing anomalies. "Journal of Finance", 51, 1, 55-84. <https://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1996.tb05202.x>
9. Mehta, M. (2004). Random Matrices. Amsterdam: Elsevier Academic Press.
10. Alon, N., Krivelevich, M. & Vu, V. H. (2002). On the concentration of eigenvalues of random symmetric matrices. "Israel Journal of Mathematics", 131, 259-268. <https://doi.org/10.1007/BF02785860>
11. Laloux, L., Cizeau, P., Potters, M., & Bouchaud, J. (2000). Random matrix theory and financial correlations. "International Journal of Theoretical & Applied Finance", 3, 391-397. <https://www.cfm.com/wp-content/uploads/2022/12/234-1999-random-matrix-theory-and-financial-correlations.pdf>
12. Plerou, V., Gopikrishnan, P., Rosenow, B., Amaral L. & Stanley, H. (1999). Universal and Nonuniversal Properties of Cross Correlations in Financial Time Series. "Physical Review Letters", 83, 7, 1471-1474. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1471>
13. Sharifi, S., Crane, M., Shamaie, A. & Ruskin H. (2004). Random matrix theory for portfolio optimization: a stability approach. "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", 335, 3-4, 629-643. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2003.12.016>
14. Nelsen, R.B. (2006). An Introduction to Copulas. New York: Springer, 2006.
15. Granger C., Maasoumi E., & Racine J. A. (2004). Dependence Metric for Possibly Nonlinear Processes. "Journal of Time Series Analysis", 25, 5, 649-669. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9892.2004.01866.x>
16. Kurowicka, D. (2006). Uncertainty Analysis with High Dimensional Dependence Modelling. New Jersey: Wiley.
17. Markowitz, H. Portfolio Selection (1952). "Journal of Finance", 7, 77-91. URL: <https://finance.martinsewell.com/capm/Markowitz1952.pdf>
18. Pafka, S. & Kondor, I. (2004). Estimated correlation matrices and portfolio optimization. "Physica A: Statistical Mechanics and its Applications", 343, 623-634. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2004.05.079>
19. Laloux, L., Cizeau, P., Bouchaud, J.-P. & Potters, M. (1999). Noise Dressing of Financial Correlation Matrices. "Physical Review Letters", 83, 7, 1467-1470. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.1467>
20. Sastry, S., Deo, N. & Franz, S. (2001). Spectral Statistics of Instantaneous Normal Modes in Liquids and Random Matrices. "Physical Review E", 64, 16305-16309. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.64.016305>
21. Bruus, H., Angles & d'Auriac J.C. (1997). Energy level statistics of the two-dimensional Hubbard model at low filling. "Physical Review B", 55, 9142-9159. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.55.9142>
22. Li, David X. (2000). On Default Correlation: A Copula Function Approach. "Journal of Fixed Income", 9, 43-54. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.187289>
23. Sengupta, A. M. & Mitra, P. P. (1999). Distributions of singular values for some random matrices. "Physical Review E", 60, 3, 3389-3392. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.60.3389>
24. Longin, F. M. (2000). From value at risk to stress testing: The extreme value approach. "Journal of Banking and Finance", 24, 1097-1130. [https://doi.org/10.1016/S0378-4266\(99\)00077-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4266(99)00077-1)

25. Scaillet, O. (2007). Kernel based goodness-of-fit tests for copulas with fixed smoothing parameters. "Journal of Multivariate Analysis", 98, 533-543. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.731784>
26. Huckins, N.W. & Rai, A. (1999). Market Risk for Foreign Currency Options: Basle's Simplified Model. "Financial Management", 28, 1, 99-109. URL: <https://ideas.repec.org/a/fma/fmanag/huckins99.html>

The article was received 23.01.2026, received after revision 19.03.2026, accepted 15.04.2026

О.М. Трофимчук, П.І. Бідюк, О.Л. Тимошук, В.Г. Гуськова, А.В. Кроптя
АНАЛІЗ ФІНАНСОВИХ РИЗИКІВ У БАГАТОВИМІРНИХ СИСТЕМАХ

Анотація. Запропоновано новий підхід для моделювання залежності між факторами багатовимірних ризиків, представлених у вигляді матриць мір залежності для чисельного опису і сімейства копул з оцінками їх параметрів для аналітичного опису, що даю можливість побудувати багатовимірну модель ризиків, за якої, окремо моделюються маргінальні розподіли з використанням еліптичних розподілів для вимірів у центрі вибірок та екстремальні розподіли у хвостових частинах, залежності між ризиками моделюються копулами. Спільний розподіл моделюється за допомогою маргінальних розподілів і копул, може бути застосований для аналізу характеристик ризиків. Розроблено підхід до визначення залежності ризиків з використанням поняття взаємної інформації в межах побудови байєсівських мереж. Обчислювальний експеримент з двома згенерованими, відомими з точки зору теорії, тривимірними розподілами та одним емпіричним тривимірним розподілом для курсів обміну валют продемонстрували можливість застосування запропонованого підходу до моделювання багатовимірного ризику.

Для вирішення проблеми пошуку структури оптимального портфеля в умовах активного керування ризиками та обмежень на ліквідність активів, запропоновано багатовимірну модель для оцінювання хвостових мір ризику. Обчислювальний експеримент, виконаний для оцінювання мір ризику шляхом генерування вибірки, забезпечив похибку оцінювання, меншу одного процента для неекстремальних квантилів. Якість оцінювання мір відхилення ризику вимагає подальшого удосконалення моделі. Якість оцінювання мір ризику для хвостових частин розподілів свідчить, що модель на основі комбінації маргінальних розподілів з використанням нормального і Парето розподілів потрібно покращити для опису центральних спостережень.

Ключові слова: системний аналіз, фінансові ризики, багатовимірний розподіл, сімейства копул, спільний розподіл, міри залежності, комбінований маргінальний розподіл.

Стаття надійшла до редакції 23.01.2026, надійшла після рецензування 19.03.2026, прийнята 15.04.2026

Трофимчук Олександр Миколайович

д.т.н., професор, член-кореспондент НАН України, директор
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 0186, м. Київ, Чоколівський бульв., 13
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274> **e-mail:** Trofymchuk@nas.gov.ua

Бідюк Петро Іванович

д.т.н., професор, професор кафедри математичних методів системного аналізу
Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7421-3565> **e-mail:** pbidyuke_00@ukr.net

Тимошук Оксана Леонідівна

к.т.н., доцент, завідувача кафедрою математичних методів системного аналізу
Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1863-3095> **e-mail:** oxana_tim@gmail.com

Гуськова Віра Геннадіївна

доктор філософії, доцентка кафедри штучного інтелекту
Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7637-201X> **e-mail:** guskovavera2009@gmail.com

Кроптя Арсен Володимирович

к.т.н., доцент кафедри математичних методів системного аналізу
Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету
України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Адреса робоча: 03056, м. Київ, Берестейський просп., 37
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1740-3837> **e-mail:** feodorit@ukr.net

UDC 519.1,514.128

Vasyl Ustimenko^{1,2}, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the information security department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2138-2357> **e-mail:** vasulustimenko@yahoo.pl

Oleksandr Pustovit², Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-1787> **e-mail:** sanyk_set@ukr.net

¹University of Royal Holloway, London, Great Britain

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

ON EXTREMAL ALGEBRAIC GRAPHS, EULERIAN TRANSFORMATIONS AND IMPLEMENTATIONS OF MULTIVARIATE CRYPTOSYSTEMS

Abstract. Results of implementation of several multivariate public keys of linear degree of size $O(n)$ and polynomial density defined over commutative ring K with the nontrivial multiplicative group K^* . are presented. The space of plaintexts of these cryptosystems is $(K^*)^n$ and space of ciphertexts is K^n . The encryption map is the restriction on $(K^*)^n$ of polynomial transformation of the space K^n which is the composition of special Eulerian transformation with cubical map of Multivariate Cryptography of kind T_1QT_2 , where T_1 and T_2 are bijective affine transformations and Q is a nonlinear map defined via walk on algebraic bipartite graph points and lines of which form the space K^n .

This scheme is implemented for the cases $K=F_q$ and $K=Z_q$, $q=2^{32}$. The knowledge of private key allows to decipher of the message from public user in time $O(n^2)$. The cryptosystems are generalisations of algorithms suggested 9 years ago cryptanalysis of which are unknown. The problem of breaking the cryptosystem is equivalent to solving of system of nonlinear equations in n variables of degree cn , $de > 0$. The computer packages for the investigation of such systems are undeveloped.

Keywords: Multivariate Cryptography, Symbolic Computations, Algebraic Graphs, Extremal Graph Theory.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.135-153>

1. Introduction

Postquantum Cryptography (PQC) is an answer to a threat coming from a full-scale quantum computer able to execute Shor's algorithm. With this algorithm implemented on a quantum computer, currently used public key schemes, such as RSA and elliptic curve cryptosystems, are no longer secure. The U.S. NIST made a step toward mitigating the risk of quantum attacks by announcing the PQC standardisation process [1]. In June 2020 NIST published a list of candidates qualified to the third round of the PQC process. Some public key candidates are implemented like PQC Round 2 candidate called Round 5 or code based classic Mc Eliece algorithm (see [2], [3]). Remaining third round candidate defined via Multivariate Cryptography belong to category of digital signatures schemes.

It is "The Rainbow Like Unbalanced Oil and Vinegar" (RUOV) algorithm. During its evaluation some cryptanalytic instruments against ROUV were found (see [4]). In July 2022 first four winners of NIST standardisation competition were chosen. They are all lattice based algorithms.

Note that the search for new solutions in Postquantum Cryptography is continued (see the proceedings of PQCrypt 2023-2025 and Eurocrypt 2023-2025, look at abstracts of Eurocrypt 2026).

Current absence of standardised Multivariate Cryptosystems stimulates further research (see classical publications [54]-[78]). In the case of instruments for Data encryption studies of multivariate maps of unbounded degree were proposed in 2017 in the paper [7]. The encryption map were defined over the arithmetical rings Z_m but as it was noticed in [8] they can be changed for the finite fields F_q . Later [2-22] the encryption was defined over an arbitrary commutative ring K with nontrivial multiplicative group K^* .

Recall that Multivariate and Noncommutative Cryptographies are among main directions of Postquantum Cryptography together with Coding based Cryptography, Lattice based Cryptography Hash based Cryptography, Superelliptic curves based Cryptography. Each of these areas is based on the complexity of certain NP hard problem. It is important that fundamental assumption of cryptography that there are non polynomial-time algorithms for solving any NP -hard problem remains valid. So all mentioned above directions are well justified theoretically and new Public Keys will appear within each direction.

Extremal algebraic graphs were traditionally used for the construction of stream ciphers of multivariate nature (see [5] and further references or [6]). Some multivariate public keys were constructed via combinations of graph based maps with highly nonlinear maps of minimal density [7], [8]. First examples of classical multivariate rules, i. e. transformations of degree 2 and 3, defined in terms of walks on graphs were obtained recently [9].

Algebraic instruments were used for the constructions of Platforms for the protocols and El Gamal type Cryptography (see [18] and [33]-[46] and cryptanalytical studies [48]-[53]). Noteworthy that all multivariate NIST candidates were presented by multivariate rule of degree bounded by constant (2 or 3) of kind $x_1 \rightarrow f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), x_2 \rightarrow f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, x_n \rightarrow f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

We think that NIST outcomes motivate investigations of alternative options in Multivariate Cryptography oriented on encryption tools for

(a) the work with the space of plaintexts $(F_q)^n$ and its transformation G of linear degree cn , $c>0$ on the level of stream ciphers or public keys;

(b) the usage of protocols of Noncommutative Cryptography with platforms of multivariate transformations for the secure elaboration of multivariate map G from $End(F_q[x_1, x_2, \dots, x_n])$ of linear or superlinear degree and density bounded below by function of kind cn^r , where $c>0$ and $r>1$.

Some ideas in directions of (a) and (b) are presented in [9]. We hope that classical multivariate public key approach, i. e. the usage of multivariate rules of degree 2 or 3 is still able to bring reliable encryption algorithms. We think that the possible change of finite field for other commutative ring like arithmetic rings modulo m can bring additional secure and efficient algorithms.

In this paper we discuss the implementation of multivariate public rules of cubic density. Recall that the density is the number of all monomial terms in a standard form $x_i \rightarrow g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $i=1, 2, \dots, n$ of multivariate map G , where polynomials g_i are given via the lists of monomial terms in the lexicographical order.

We use the known family of graphs $D(n, q)$ and $A(n, q)$ of increasing girth (see [19], [20], [21]) and further references) and their analogs $D(n, K)$ and $A(n, K)$ defined over finite commutative ring K with unity for the construction of our public keys.

Noteworthy to mention that for each prime power $q, q > 2$ graphs $D(n, q), n = 2, 3, \dots$ form a family of graphs of large girth (see [20]). There is well defined projective limit of these graphs which is a q -regular forest. In fact if K is an integral domain both families $A(n, K)$ and $D(n, K)$ are approximations of infinite dimensional algebraic forests. The definitions of such approximations are given in Section 3 together with a short survey of their usage.

In Section 2 we present the known mathematical definitions of some objects of algebraic geometry for the further usage of them as instruments of Multivariate Cryptography. In particular definitions of affine Cremona semigroup of endomorphisms of multivariate ring $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ defined over commutative ring K and affine Cremona group ${}^nCG(K)$ are presented there.

The concept of *trapdoor accelerator* of the transformation from affine Cremona semigroup ${}^nCS(K)$ is presented there as a piece of information which allows computation of reimage of the map in time $O(n^2)$.

This is a weaker version of the definition of trapdoor one way function. The definition of the trapdoor accelerator is independent from the conjecture $P \neq NP$ of the Complexity theory.

In section 3 we consider special class of algebraic graphs known as *linguistic graphs*.

Together with arbitrary linguistic graph $\Gamma(K)$ defined over finite commutative ring with unity one can consider associated graph $\Gamma = \Gamma'(K[x_1, x_2, \dots, x_n])$. We use this possibility to use walks in Γ' and well defined special colouring on this graph for the construction of polynomial transformations on selected partition set. Section 4 is dedicated to special families of linguistic graphs with remarkable extremal properties.

In the case of these linguistic graphs degrees of multivariate transformations defined in terms of walks and the colouring are at most 3. We use this fact to define cubic trapdoor accelerators and construct trapdoor accelerators on unbounded degree and polynomial density. They can be used for the constructions of multivariate public keys.

Some properties of these cryptosystems are considered in Section 5. Detailed implementations of procedures for generating of multivariate public key and private key decryption are given in Section 6. Last section contains conclusive remarks.

2. On elements of Algebraic Geometry and trapdoor accelerators

Let K be a commutative ring with a unity. We consider the ring $K' = K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ of multivariate polynomials over K . Endomorphisms σ of K' can be given via the values of $\sigma(x_i) = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), f_i \in K'$.

They form the semigroup $\text{End}(K[x_1, x_2, \dots, x_n]) = {}^nCS(K)$ of K' known also as affine Cremona semigroup (see [22], [23]) after the famous Luigi Cremona (see [24]). The map $\sigma': (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow (f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n))$ is polynomial transformation of affine space K^n .

These transformations generate transformation semigroup ${}^nCS(K^n)$. Note that the kernel of homomorphism of ${}^nCS(K)$ to ${}^nCS(K^n)$ sending σ to σ' depends on the choice of commutative ring K . Affine Cremona Group ${}^nCG(K) = \text{Aut}(K[x_1, x_2, \dots, x_n])$ acts bijectively on K^n . Noteworthy that some elements of ${}^nCS(K)$ can act bijectively on K^n but do not belong to ${}^nCG(K)$.

For instance endomorphism $x \rightarrow x^3$ of $R[x]$ acts bijectively on the set R of real numbers but the inverse $x \rightarrow x^{1/3}$ of this map is a birational element outside of ${}^1CG\mathbb{R}$. Recall that degree of σ is the maximal degree of polynomials $\sigma(x_i)$, $i=1, 2, \dots, n$. The density of σ is a total number of monomial terms in all $\sigma(x_i)$.

Assume that automorphism F from ${}^nCG(K)$ has constant degree d , $d \geq 2$. It is given in its standard form written as $x_1 \rightarrow f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_2 \rightarrow f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$, ..., $x_n \rightarrow f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ where f_i , $i=1, 2, \dots, n$ are elements of $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ and used as public rule to encrypt plaintexts from K^n .

The following definition was motivated by the idea to have a weaker version of trapdoor one way function.

We say that family $F_n \in {}^nCG(K)$ of nonlinear polynomial transformations of affine space K^n has *trapdoor accelerator* ${}^nT$ if the knowledge of piece information ${}^nT$ ("trapdoor accelerator") allows to compute the reimage x for F_n in time $O(n^2)$.

If F is bijective of degree bounded by constant c and the degree of F_n^{-1} is at least d , $d \geq 3$ we say that ${}^nT$ is of level d .

Notice that if F_n are given by their standard forms and degrees of F_n^{-1} are equal to d then the inverse can be approximated in polynomial time $f(n, d) = O(n^{d/2})$ via linearisation technique.

One can see that the approximation task becomes unfeasible if d is "sufficiently large" like $d=100$. Examples of cubic families F_n with trapdoor accelerator of high level t are given in the case of special finite fields F_q in the in [9].

Let ${}^nES(K)$ stands for the semigroup of Eulerian endomorphisms, i. e. endomorphisms σ from ${}^nCS(K)$ such that $\sigma(x_i) = a_i x_1^{(i, 1)} x_2^{a(i, 2)} \dots x_n^{a(i, n)}$, where a_i are elements of multiplicative group K^* of the ring. We consider the group ${}^nEG(K)$ of all invertible elements of ${}^nES(K)$ as transformations of $(K^*)^n$.

We consider the totality $TA(n, K)$ of toric endomorphisms, i. e. endomorphisms σ from ${}^nCS(K)$ such that their restrictions on $(K^*)^n$ are injective maps into K^n . For σ from $TA(n, K)$ we define its *toric inverter* as polynomial map σ' from ${}^nCS(K)$ such that $\sigma' \sigma$ acts on $(K^*)^n$ as identity.

It is easy to see that if $G \in TA(n, K)$ and $H \in {}^nEG(K)$ then composition HG of H and G is a toric endomorphism as well. Assume that automorphism F from ${}^nCG(K)$ has constant degree d , $d \geq 2$. It is given in its standard form written as $x_1 \rightarrow f_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$, $x_2 \rightarrow f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$, ..., $x_n \rightarrow f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$, where f_i , $i=1, 2, \dots, n$ are elements of $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ and used as public rule to encrypt plaintexts from K^n .

Then we can use *Eulerisation* of this public rule given by standard form of $G_n = HF$ where H is an element of ${}^nEG(K)$. New public rule uses space of plaintexts $(K^*)^n$ and space of ciphertexts K^n .

Noteworthy that the decryption is equivalent to consecutive application of $(F_n)^{-1}$ and inverse H'_n in ${}^nEG(K)$ of the map H_n . Noteworthy that standard form of this composition is of nonpolynomial density.

More general class of multivariate rules is the totality of toric multivariate rules G of kind $x_i \rightarrow G_i$ where G is a toric endomorphism of $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$ of constant degree d . We can take element H of ${}^nES(K)$ in "general position" and consider HG_n of linear degree and polynomial density instead of G_n . We say that HG_n is an Eulerisation of G_n .

3. Linguistic graphs and symbolic computations

Let K be a commutative ring. We refer to an incidence structure with a point set $P = P_{s,m} = K^{s+m}$ and a line set $L = L_{r,m} = K^{r+m}$ as linguistic incidence structure $I_m(K)$ of type (s, r, m) if point $x = (x_1, x_2, \dots, x_s, x_{s+1}, x_{s+2}, \dots, x_{s+m})$ is incident to line $y = [y_1, y_2, \dots, y_r, y_{r+1}, y_{r+2}, \dots, y_{r+m}]$ if and only if the following relations hold $a_1 x_{s+1} + b_1 y_{r+1} = f_1(x_1, x_2, \dots, x_s, y_1, y_2, \dots, y_r)$, $a_2 x_{s+2} + b_2 y_{r+2} = f_2(x_1, x_2, \dots, x_s, x_{s+1}, y_1, y_2, \dots, y_r, y_{r+1})$, $\dots$, $a_m x_{s+m} + b_m y_{r+m} = f_m(x_1, x_2, \dots, x_s, x_{s+1}, \dots, x_{s+m}, y_1, y_2, \dots, y_r, y_{r+1}, \dots, y_{r+m})$,

where a_j and b_j , $j=1, 2, \dots, m$ are not zero divisors, and f_j are multivariate polynomials with coefficients from K . Brackets and parenthesis allow us to distinguish points from lines (see [25] or [6] and further references). The colour $\dot{p}(x) = \dot{p}(\langle x \rangle)$ ($\dot{p}(y) = \dot{p}(\langle y \rangle)$) of point (x) (line $\langle y \rangle$) is defined as projection of an element (x) (respectively $\langle y \rangle$) from a free module on its initial s (relatively r) coordinates. As it follows from the definition of linguistic incidence structure $I_m(K)$ for each vertex of its incidence graph $\Gamma(m, K)$ there exists the unique neighbour of a chosen colour.

For each $b \in K^r$ and $p = (p_1, p_2, \dots, p_{s+m})$ there is the unique neighbour of the point $\langle l \rangle = N_b(p)$ with the colour b . Similarly, for each $c \in K^s$ and line $l = [l_1, l_2, \dots, l_{r+m}]$ there is the unique neighbour of the line $(p) = N_c(\langle l \rangle)$ with the colour c . We refer to operator of taking the neighbour of vertex accordingly chosen colour as *neighbourhood operator*.

On the sets P and L of points and lines of linguistic graph we define jump operators $J = J_b(p) = (b_1, b_2, \dots, b_s, p_{s+1}, p_{s+2}, \dots, p_{s+m})$, where $(b_1, b_2, \dots, b_s) \in K^s$ and $J = J_b(\langle l \rangle) = [b_1, b_2, \dots, b_r, l_{r+1}, l_{r+2}, \dots, l_{r+m}]$, where $(b_1, b_2, \dots, b_r) \in K^r$ for the point $(p_1, p_2, \dots, p_{s+m})$ and the line $\langle l_1, l_2, \dots, l_{r+m} \rangle$.

Noteworthy, that the path in $v_0, v_1, \dots, v_k$ the linguistic graph I_m is determined by starting vertex v_0 and colours of vertexes $v_1, v_2, \dots, v_k$. We can take commutative ring $R = K[y_1, y_2, \dots, y_l]$ and consider graph $I_m(K)$ together with infinite graph $I_m^{\otimes} = I_m(K[y_1, y_2, \dots, y_l])$ defined by the same polynomials f_i , $i=1, 2, \dots, m$ with coefficients from K but with partition sets R^{s+m} and R^{r+m} .

Assume that $l = m + s$. We can consider the path in $I_m^{\otimes}$ of length $2k$ in with starting point $(y_1, y_2, \dots, y_s, y_{s+1}, y_{s+2}, \dots, y_{s+m})$ and consecutive colours $G_1, H_1, G_2, H_2, \dots, G_k, H_k$ such that $G_i \in K[x_1, x_2, \dots, x_s]^s$ and $H_i \in K[x_1, x_2, \dots, x_s]^r$.

The last vertex of this path will be a point (p) with consecutive coordinates $h_1, h_2, \dots, h_s, f_{s+1}, f_{s+2}, \dots, f_{s+m}$ where $f_1, f_2, \dots, f_{s+m}$ are elements of $K[x_1, x_2, \dots, x_s, x_{s+1}, x_{s+2}, \dots, x_{s+m}]^s$.

Finally we consider $u = J_H(p)$ where $H = (g_1, g_2, \dots, g_s)$ is the element of $K[x_1, x_2, \dots, x_s]^s$. We define *passage transformation* ${}^{\Gamma(m,K)}Pas(G_1, G_2, \dots, G_k, H_1, H_2, \dots, H_k, H)$ of K^{r+s} (space of points) with symbolic colours $G_1, H_2, \dots, G_k, H_k$ and H via multivariate rule $y_1 \rightarrow g_1(y_1, y_2, \dots, y_s)$, $y_2 \rightarrow g_2(y_1, y_2, \dots, y_s)$, $\dots$, $y_s \rightarrow g_s(y_1, y_2, \dots, y_s)$, $y_{s+1} \rightarrow f_{s+1}(y_1, y_2, \dots, y_{s+m})$, $y_{s+2} \rightarrow f_{s+2}(y_1, y_2, \dots, y_{s+m})$, $\dots$, $y_{s+m} \rightarrow f_{s+m}(y_1, y_2, \dots, y_{s+m})$. It is easy to see that this transformation is bijective if the map $y_i \rightarrow h_i(y_1, y_2, \dots, y_s)$, $i=1, 2, \dots, s$ is bijective on K^s .

We are searching for families of linguistic graphs $\Gamma(m, K)$ of type (r, s, m) with constant parameters r and s and $m=1, 2, \dots$ such that standard forms of nonlinear transformations $F_m = {}^{\Gamma(m,K)}Pas(G_1, G_2, \dots, G_k, H_1, H_2, \dots, H_k, H)$, $k=O(m)$ where symbolic colours are taken from a special class of tuples have trapdoor accelerator $G_1, G_2, \dots, G_k, H_1, H_2, \dots, H_k, H$.

Several examples of such families with $s=r=1$ will be introduced in the following sections.

4. On algebraic forest approximations and their applications

We define thick forest as simple graph without cycles such that each of its vertex has degree at least 3. In probability theory branching process is a special stochastic process corresponding to a random walk on a thick forest. A genealogy of single vertex is a tree.

One of the basic properties of finite tree is the existence of a leaf, i. e. vertex of degree 1. Thus each thick tree is an infinite simple graph.

Let K be a commutative ring and K^n be an affine space of dimension n over K (free module in other terminology). A subset M in K^n is an algebraic set over K if it is a solution set for the system of algebraic equations of kind $f=0$ or inequalities of kind $g \neq 0$ where f and g are elements of $K[x_1, x_2, \dots, x_n]$. There are several alternative approaches to define dimension of M . In the case when K is a field these approaches are equivalent and dimension of M can be computed with the usage of Gröbner basis technique (see [26], [27], [28]).

We say that graph Γ is algebraic over K if its vertex and edge sets are algebraic sets over K . We investigate a possibility to define thick forest F by system of equations over some commutative ring K , i.e. construct F as a projective limit of algebraic over K bipartite graphs Γ_i , $i=1, 2, \dots$. Noteworthy that the girth $g_i = g(\Gamma_i)$, which is the length of minimal cycle in Γ_i tends to infinity when i is growing. In this situation we refer to F as algebraic forest over K . We say that the family Γ_i is an algebraic forest approximation over the ring K .

In the case $g_i \geq cn_i$, where n_i are dimensions of the algebraic sets $V(\Gamma_i)$ of vertices of the graph Γ_i and c is some positive constant we use term *algebraic forest approximation of large girth*. Note that algebraic forest approximations of large girth over finite field F_q , $q > 2$ are *families of graphs of large girth* in sense of P. Erdős' (see [29] and further references).

The first algebraic forest approximation of a large girth was introduced by F. Lazebnik and V. Ustimenko (see [19]) in the case of $K=F_q$. The properties of trees of this algebraic forest and their approximations over F_q were investigated in the paper by [20].

In 1998 more general algebraic graphs $D(n, K)$ defined over arbitrary commutative ring K were introduced (see [30] and further references). It was stated that a girth of $D(n, K)$ is $\geq n+5$ in the case of arbitrary integrity domain K . This inequality insures that is algebraic forest approximation of large girth. The prove of the inequality reader can find in [30], simpler prove of this fact the reader can find in [31].

Noteworthy that in the case of integrity domain K together with $D(n, K)$, $n=2, 3, \dots$ one can consider another thick forest approximation $D(n, K[x_1, x_2, \dots, x_m])$, $n=2, 3, \dots$ for each parameter m . Thus paper [30] opened a possibility to use extremal properties of these graphs in the Theory of Symbolic Computations and its various applications to Cryptography.

The paths of even length t on trees and their approximations can be used to induce multivariate transformations on varieties P_i and L_i of points and lines of the large cycle indicator. We can assume that c is the largest possible constant for the property in the definition.

These transformations can serve as encryption maps acting on the potentially infinite space P_i of plaintexts (see [6] and further references). They form a group $G_i = G(\Gamma_i)$, which can be a platform for the protocols of Noncommutative

Cryptography (see [18], [32]-[46]). Noteworthy that if t is at most half of the girth of Γ_i then different paths produce distinct transformations. So, forest approximations of large girth are preferable for cryptographic applications.

Other tree approximation over the integrity domain K is formed by graphs $A(n, K)$ considered in [47]. In fact these graphs were defined earlier [30] as homomorphic images $E(n, K)$ of graphs $D(n, K)$ or their connected components $CD(n, K)$. As it was stated recently in short paper [21] for each integrity domain.

$K, K \neq F_2$ graphs $A(n, K)$ form a tree approximation of large girth.

For each vertex v of graph Γ we define its cycle indicator $Cind(v)$ as length of the shortest cycle through v . We define cycle indicator $Cind(\Gamma)$ of the graph as maximal value of $Cind(v)$ via all vertexes of the graph.

Let family Γ_i be an algebraic forest approximation over the ring K . In the case $Cind(\Gamma_i) \geq cn_i$ where n_i are dimensions of the algebraic manifold $V(\Gamma_i)$ of vertices of the graph Γ_i and c is some positive constant we use term algebraic forest approximation with large cycle indicator. $A(n, K)$ form algebraic forest approximation with large cycle indicator for which $c=2$. Noteworthy that speed of girth growth for $A(n, F_q)$ is not evaluated properly yet. Some encryption algorithms (stream ciphers) based on $A(n, K)$ and $D(n, K)$ were already introduced (see [6] and further references). Note that research on design of new stream ciphers based on these graph is in progress (see [79]-[81]).

For the constructions of multivariate public keys the following observation is important type. Graphs $A(n, K)$ and $D(n, K)$ are linguistic graphs of type $(1, 1, n-1)$, the incidence between point $(p_1, p_2, \dots, p_n)$ and line $[l_1, l_2, \dots, l_n]$ is defined by the system of equations $p_i - l_i = p_{t(i)} l_{j(i)}$ where $l(i) < i, j(i) < i, i=2, 3, \dots, n$.

The following statement follows directly from the written above equations.

Proposition 1. *Let $\Gamma(n, K)$ be one of the graphs $A(n, K)$ or $D(n, K)$ defined over commutative ring K .*

Assume that degrees of polynomials $g_i(y)$, $h_i(y)$ and $h(y)$ from $K[y]$ are bounded by constant c , $h(y)$ is from ${}^1CG(K)$ and $j=O(n)$. Then polynomial map $G=Pas(g_1, g_2, \dots, g_j, h_1, h_2, \dots, h_j, h)$ has trapdoor accelerator $g_i, h_i, h, i=1, 2, \dots, j$.

Remark. *This statements can be generalized for the class of linguistic graphs of $\Gamma(n, K)$ type $(1, 1, n-1)$ such that densities of f_i are bounded by some constant. The easiest choice for $h(y)$ is a linear expression $ay+b$ with regular a .*

To use this fact in Cryptography we have to evaluate degree or density of $G=Pas(g_1, g_2, \dots, g_j, h_1, h_2, \dots, h_j, h)$ and G^{-1} .

The following statement can be found in [6].

Theorem 1. *Let K be a commutative ring with unity. $\Gamma(n, K)$ be one of the graphs $A(n, K)$ or $D(n, K)$. Then degree of $Pas(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, y+b_j), j \geq 1$ is three.*

The statement below is an instant corollary of Proposition 1 and Theorem 1.

Lemma 1. *Let $\Gamma(n, K)$, $h(y)$ and j satisfy to conditions of Proposition 1 and $\deg(h(y)) \leq 3$. Then degree of the automorphism*

$Pas(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, h(y)), h(y), j \geq 1$ is 3.

The following statement is proven in [9].

Lemma 2. *Let K coincides with $F_q, q=2^m, m \geq 3, \Gamma(n, K)$, $h(y)$ and j satisfy to conditions of Proposition 1 and $h(y)=ay^2+b, a \neq 0$. Then standard form of cubic automorphism $Pas(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, h(y))$ has trapdoor accelerator ${}^nT$ which is a sequence $y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, ay^2+b$ of level $d \geq 2^{m-1}$.*

We can modify the cubic map of presented above lemma via affine transformations T_1 and T_2 from $AGL_n(F_q)$ and get $G = T_1 \text{ Pas}(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, h(y)) T_2$.

Then new map has the trapdoor accelerator $T_1, T_2, {}^nT$ (see [9]) of the same level with ${}^nT$. We implemented the Eulerisation of this map, i. e. toric endomorphism EG , where E is obtained as composition of “upper triangular element” ${}^1E$

$$\begin{aligned} x_1 &\rightarrow q_1 x_1^{a(1,1)} x_2^{a(1,2)} \dots x_n^{a(1,n)}, \\ x_2 &\rightarrow q_2 x_2^{a(2,2)} x_2^{a(2,3)} \dots x_n^{a(2,n)}, \end{aligned}$$

...,

$$x_n \rightarrow q_n x_n$$

and lower triangular element

$$\begin{aligned} x_1 &\rightarrow r_1 x_1^{b(1,1)}, \\ x_2 &\rightarrow r_2 x_1^{b(2,1)} x_2^{b(2,2)}, \end{aligned}$$

...,

$x_n \rightarrow r_n x_1^{b(n,1)} x_2^{b(n,2)} \dots x_n^{b(n,n)}$ where q_i and r_i are nonzero elements of F_q , elements $a(i,j)$, $b(i,j)$ are from the group Z_{q-1} and elements $a(i,i)$, $b(i,i)$ are mutually prime with the modulo $q-1$.

Noteworthy that computation of the inverse elements of ${}^1E$ and ${}^2E$ is straightforward.

It means that reimage of the restriction of standard form F of toric map ${}^1E^2ET_1 \text{ Pas}(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, y^2+b) T_2$ onto $(F_q)^*$ has trapdoor accelerator ${}^nT$ which consist of ${}^1E, {}^2E, T_1, T_2$ and tuple $(a_1, a_2, \dots, a_j, b_1, b_2, \dots, b_j, b)$ of length $2j+1$.

We can estimate the density $\text{den}(F)$ of F easily. One can see that $\text{den}(F)$ coincide with the density $\text{den}(G)$ of quadratic map. Each of $G(y_i)$ consists of $O(n^2)$ monomial terms. So all $F(y_i)$, $i=1, 2, \dots, n$ together contains $O(n^3)$ monomial terms. Notice that computation of each term of linear degree takes time $O(n)$.

The implementations of public key cryptosystems based on the map F and its trapdoor accelerator in the case of finite field of order 2^{32} are and arithmetic ring Z_q are presented in the next section.

Computed parameters $\text{den}(F)$ are given there.

5. On the feasibility of implementations of cryptosystems

Computed parameters $\text{den}(F)$ are given there. This cryptosystem is an obfuscation of public key [7] based on toric endomorphism ${}^1E^2ET_1 \text{ Pas}(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, y+b) T_2$.

Main difference between these maps is the following fact. The trapdoor accelerator of bijective map G is cubic in the case of old scheme and it has level 2^{m-1} in the case of new scheme based on the finite field of order 2^m .

We can change the finite field of characteristic 2 for the field F_q where $q-1$ is mutually prime with 3 and change the term y^2+b in our trapdoor accelerator for expression y^3+b . The level of corresponding cubic trapdoor accelerator is discussed in [9].

Proposition 2. Let $\Gamma(n, K)$ be one of a linguistic graph of type $(1, 1, n-1)$ defined over commutative ring K via equations with righthand sides $f_i(x)$ of density $O(1)$ bounded by constant c .

Assume that degrees of polynomials $g_i(y)$, $h_i(y)$ and $h(y)$ from $K[y]$ are bounded by constant c , $h(y)$ is from ${}^1EG(K)$ and $j=O(n)$.

Then toric endomorphism $G = \text{Pas}(g_1, g_2, \dots, g_j, h_1, h_2, \dots, h_j, h)$ has trapdoor accelerator $g_i, h_i, h, i=1, 2, \dots, j$.

Proof. Let G' be the restriction of G onto $(K^*)^n$. Then equations $G'(x)=c$ where $c=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ has to be found via the following procedure. Firstly we have to solve the equation $h(x)=c_1$. Let t be the solution. Secondly we have to look at the path in the graph $\Gamma(n, K)$ with the starting point $(h_j(t), c_2, c_3, \dots, c_n)$ and consecutive colours $g_j(t), h_{j-1}(t), g_{j-1}(t), h_{j-2}(t), \dots, g_1(t), t$. The final point of this walk is the reimage $p=(t, p_2, p_3, \dots, p_n)$. So point p is uniquely determined. The complexity of presented procedure is $O(n^2)$.

We are investigating properties of the toric endomorphism described in Proposition 2 for the cases $\Gamma(n, K)=A(n, K), \Gamma(n, K)=D(n, K), K=\mathbb{Z}_m$ where $(3, \varphi(m))=1$ with the trapdoor accelerator of kind $y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, y^3+b$. For the implementation we select the case $m=2^t, t \geq 2$. In this case Euler function φ has value $2 \cdot 2^{t-1}$. So we have $(3, 2^{t-1})=1$ for each value of t . The toric inverse for G has polynomial degree $\geq 2^{m(t-1/2)}$ (see [archive]).

The map of kind $T_1 \xrightarrow{\Gamma(m,K)} \text{Pas}(G_1, G_2, \dots, G_k, H_1, H_2, \dots, H_k, y^3+b)T_2$, where T_1 and T_2 are elements of $AGL_n(\mathbb{Z}_m)$ will be a toric automorphism if in the expression $T_1(y_1)=a_1y_1+a_2y_2+\dots+a_ny_n+a_{n+1}$ the number of odd $a_i, i=1, 2, \dots, n$ is odd.

We generate the Eulerisation of this map with $G_i=y+a_i$ and $H_i=y+b_i$ of kind $F=\text{Pas}(y+a_1, y+a_2, \dots, y+a_j, y+b_1, y+b_2, \dots, y+b_j, y^3+b)T_2$.

The conditions $a_i \neq a_{i+1}, b_i \neq b_{i+1}$ insure the used walk in $\Gamma(n, K)$ is a path. Noteworthy that density of F is $O(n^3)$. The multivariate public key based on F as above is the obfuscation of cryptosystems described in [7], [8].

To implement considered above cryptosystem one need just knowledge on the explicit constructions of graphs $A(n, K)$ and $D(n, K)$. We present this missing information below.

Let K be a commutative ring.

We define $A(n, K)$ as bipartite graph with the point set $P=K^n$ and line set $L=K^n$ (two copies of a Cartesian power of K are used). We will use brackets and parenthesis to distinguish tuples from P and L .

So $(p)=(p_1, p_2, \dots, p_n) \in P_n$ and $[l]=[l_1, l_2, \dots, l_n] \in L_n$.

The incidence relation $I=A(n, K)$ (or corresponding bipartite graph Γ) is given by condition $p I l$ if and only if the equations of the following kind hold.

$$\begin{aligned} p_2 - l_2 &= l_1 p_1, \\ p_3 - l_3 &= p_1 l_2, \\ p_4 - l_4 &= l_1 p_3, \\ p_5 - l_5 &= p_1 l_4, \end{aligned}$$

...

$$p_n - l_n = p_1 l_{n-1} \text{ for odd } n \text{ and } p_n - l_n = l_1 p_{n-1} \text{ for even } n.$$

The following interpretation of a family of graphs $D(n, K)$ in case of general commutative ring K can be found in [5].

Let us use the same notations for points and lines as in previous case of graphs $A(n, K)$.

Points and lines are elements of two copies of the affine space over K . Point $(p)=(p_1, p_2, \dots, p_n)$ is incident with the line $[l]=[l_1, l_2, \dots, l_n]$ if the following relations between their coordinates hold:

$$\begin{aligned} p_2 - l_2 &= l_1 p_1, \\ p_3 - l_3 &= p_1 l_2, \end{aligned}$$

$$p_4 - l_4 = l_1 p_3,$$

...

$$l_i p_i = p_1 l_{i-2} \text{ if } i \text{ congruent to } 2 \text{ or } 3 \text{ modulo } 4,$$

$$l_i p_i = l_1 p_{i-2} \text{ if } i \text{ congruent to } 1 \text{ or } 0 \text{ modulo } 4.$$

6. The outline of public key algorithm and remarks on its implementation

6.1. The computation of multivariate rule

Alice has to use some software package for symbolic computation like SAGE or other tools to works.

Firstly she has to select the ring K . It can be F_q or Z_q where $q=2^m$, $m \geq 8$. Secondly Alice chooses parameter n for the work with the space of plaintexts $(K^*)^n$.

She selects two affine transformation T_1 and T_2 from $AGL_n(K)$. In the case of Z_q the linear expression $T_1(y_1) = c_1 y_1 + c_2 y_2 + \dots + c_n y_n + c_{n+1} = 1$ has to be with odd number of odd coefficients c_i , $i=1, 2, \dots, n, n+1$ from Z_q .

Additionally Alice selects parameter j of size $O(n)$ together with parameters $a_1, a_2, \dots, a_j, b_1, b_2, \dots, b_j$ and b . The conditions $a_i \neq a_{i+1}$, $b_i \neq b_{i+1}$ insure that used walk in the graph is a path.

After that Alice selects elements $a(i, j)$ and $b(i, j)$ from definitions of toric transformations ${}^1E$ and ${}^2E$ such that $(a(i, i), d) = 1$, $(b(i, i), d) = 1$ where d is the order of group K^* .

Finally she selects the graph $\Gamma(n, K)$ making a choice between $D(n, K)$ or $A(n, K)$. Alice sets initial tuple $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ and conducts the following steps.

Step 1. Alice forms the tuple $u = ({}^1E(y_1), {}^2E(y_2), \dots, {}^1E(y_n))$ and form intermediate tuple ${}^2E(u) = z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$. Noteworthy that z_i are monomial terms in variables $y_1, y_2, \dots, y_n$.

Step 2. Alice uses affine transformation T_1 and compues $T_1(z) = v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$. Noteworthy that v_i are polynomials in variables y_i , $i=1, 2, \dots, n$.

Step 3. She works with graph $\Gamma(n, K[y_1, y_2, \dots, y_n])$. Alice forms the path with the starting point $(v_1, v_2, \dots, v_n)$ and sequence of consecutive colours $v_1 + b_1, v_1 + a_1, v_1 + b_2, \dots, v_1 + b_j, v_1 + a_j$. She computes the final point of this path $(v_1 + a_j, f_2, f_3, \dots, f_n) = p$. For this procedure Alice use operations of addition and multiplication of the commutative ring $K[y_1, y_2, \dots, y_n]$.

Step 4. Alice changes the first coordinate of tuple (p) and gets $r = ((v_1)^e + b, f_2, f_3, \dots, f_n) = (r_1, r_2, \dots, r_n)$, where $e=2$ in the case of $K=F_q$ and $e=3$ for the case $K=Z_q$.

Step 5. She computes $T_2 \otimes (g_1, g_2, \dots, g_n)$ where g_i are presented in their standard form. So Alice is ready to send the multivariate rule $G: y_1 \rightarrow g_1(y_1, y_2, \dots, y_n), y_2 \rightarrow g_2(y_1, y_2, \dots, y_n), \dots, y_n \rightarrow g_n(y_1, y_2, \dots, y_n)$ to public user Bob.

Public users work with the space of plaintexts $(K^*)^n$ and space of ciphertexts $(K)^n$. The complexity of usage of G is $O(n^4)$.

6.2. On the private key description procedure

Alice gets from Bob the ciphertext $c = G(p)$ where p is the plaintext of the public user. She use her knowledge of the trapdoor accelerator ${}^1E, {}^2E, T_1, T_2, a_i, b_i, b, e$ and graph $\Gamma(n, K)$. Noteworthy that Alice can use ready for the usage transformations ${}^1E^{-1}, {}^2E^{-1}, T_1^{-1}, T_2^{-1}$.

Alice decrypt the ciphertext via the following procedure.

Step 1. She computes the tuple ${}^1c = T_2^{-1}(c)$.

Step 2. Alice solve equation $(v_l)^e + b = {}^1c_l$ with the unknown v_l and gets $v_l = v^*$. Noteworthy that in the case of commutative ring $K = Z_q$ the parameter v^* is odd.

Step 3. Alice forms the point ${}^2c = (v^* + a_j, {}^1c_2, {}^1c_3, \dots, {}^1c_n)$ of the graph $\Gamma(n, K)$. She considers the path with the starting point ${}^2c$ given by consecutive colours $v^* + b_j, v^* + a_{j-1}, v^* + b_{j-1}, v^* + a_{j-2}, v^* + b_{j-2}, \dots, v^* + a_1, v^* + b_1, v^*$. Alice computes the final point of this path ${}^3c$. In the case of $K = Z_q$ the first coordinate of ${}^3c$ is an odd residue modulo q .

Step 4. Alice computes ${}^4c$ as $(T_1)^{-1}({}^3c)$.

Step 5. She applies consecutively ${}^2E$ and ${}^1E$ and computes the plaintext as ${}^1E^{-1}({}^2E^{-1}({}^4c))$.

We implement firstly these procedures in cases of graphs $A(n, K)$ for $n = 16, 32, 64, 128$ and $K = F_q, K = Z_q$. We use the case when $j = n$ and T_1, T_2 are linear transformations given by the matrices with nonzero entries. It turns out that the results of computer simulations do not depend on the choice of the matrices and toric transformations ${}^1E$ and ${}^2E$ in the general position.

Let $S(n, K)$ stands for the length of plaintext in bites and $N(n, K)$ is the density of the multivariate map in the case of graph, i. e. total number of its monomial terms. The pairs of these parameters are given below

$(S(16, F_q), N(16, F_q)) = (512, 6440),$
 $(S(16, Z_q), N(16, Z_q)) = (496, 15504),$
 $(S(32, F_q), N(32, F_q)) = (1024, 50720),$
 $(S(32, F_q), N(16, F_q)) = (992, 209440),$
 $(S(64, F_q), N(64, F_q)) = (2048, 399424),$
 $(S(64, Z_q), N(64, F_q)) = (1984, 3065920),$
 $(S(128, F_q), N(128, F_q)) = (4096, 3170432),$
 $(S(128, Z_q), N(128, Z_q)) = (3968, 468665600).$

Change of $A(n, K)$ for $D(n, K)$ produces similar results.

The encryption procedure requires computation of the sum of $N(n, K)$ monomial terms of kind $x_1^{a(1)} x_2^{a(2)} \dots x_n^{a(n)}$ where $a(i)$ are integers within the interval $[0, d-1]$ where d is $2^{32}-1$ for $K = F_q$ and $d = 2^{31}$ for $K = Z_q$. To speed up this procedure we used loaded tables for function $e(x, y) = x^y$ where x is element of K^* and y is in Z_d . So the size of table is d^2 .

To computation of the ciphertext requires $nN(n, K)$ usages of $e(x, y)$ together with $nN(n, K)$ multiplications and $N(n, K)$ additions. This part of computation depends heavily on the choice of computer. It is easy to see that Alice conducts decryption in essentially shorter time than encryption by public user.

We implement the cryptosystems in the cases of graphs $A(n, K)$ and $D(n, K)$ in cases of finite fields and arithmetical rings in various cases of length j of the symbolic word.

Below we present the measurement of densities of the encryption map. These parameters are important for the evaluation of the execution speed. They illustrate nonlinear nature of encryption function.

We consider 3 following cases.

Case 1. Both linear transformations in the combination are identity maps.

Case 2. Both linear transformations are maps of kind $x_i \rightarrow x_i + a_2 x_2 + a_3 x_3, \dots, a_n x_n, a_i \neq 0, x_j \rightarrow x_{i+j}$ for $j = 1, 3, \dots, n$.

Case 3. Both linear maps have nonsingular matrices with nonzero entries.

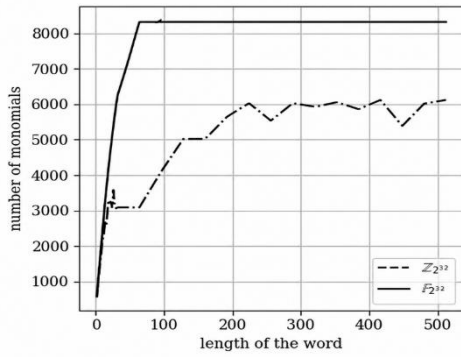


Fig. 1. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph ($n = 128$) (graph $D(n, K)$, $K = Z_{2^{32}}, F_{2^{32}}$), case I

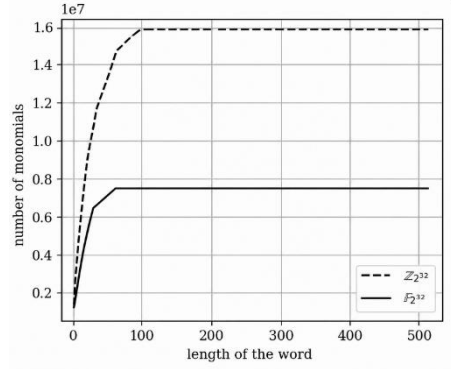


Fig. 2. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph ($n = 128$) (graph $D(n, K)$, $K = Z_{2^{32}}, F_{2^{32}}$), case II

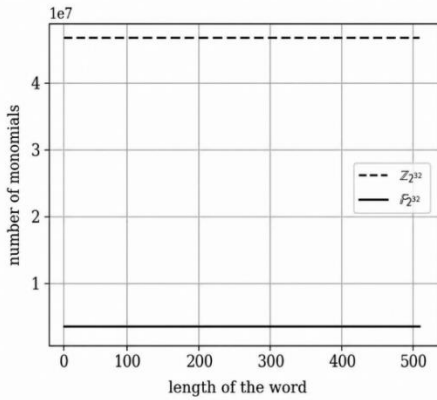


Fig. 3. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph ($n = 128$) (graph $D(n, K)$, $K = Z_{2^{32}}, F_{2^{32}}$), case III

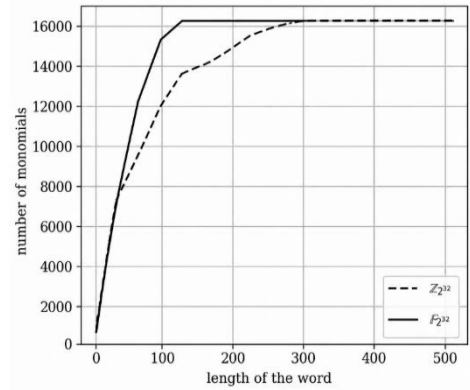


Fig. 4. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph ($n = 128$) (graph $A(n, K)$, $K = Z_{2^{32}}, F_{2^{32}}$), case I

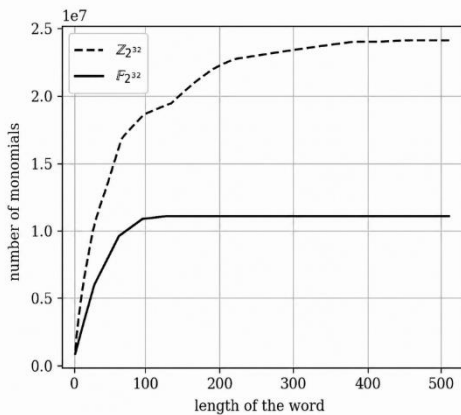


Fig. 5. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph ($n = 128$) (graph $A(n, K)$, $K = Z_{2^{32}}, K = F_{2^{32}}$, case II

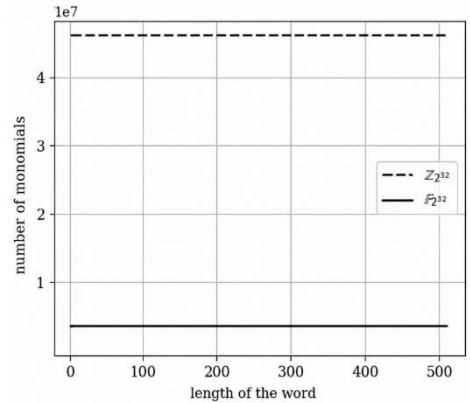


Fig. 6. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph ($n = 128$) (graph $A(n, K)$, $K = Z_{2^{32}}, K = F_{2^{32}}$, case III

Table 1. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph $D(n, F_{2^{32}})$, case I

	length of the word				
n	16	32	64	128	256
16	145	145	145	145	145
32	544	545	545	545	545
64	1584	2112	2113	2113	2113
128	3664	6240	8320	8321	8321

Table 2. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph $D(n, F_{2^{32}})$, case II

	length of the word				
n	16	32	64	128	256
16	3649	3649	3649	3649	3649
32	41355	41356	41356	41356	41356
64	440147	529052	529053	529053	529053
128	3823600	6149213	7405944	7405945	7405945

Table 3. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph $D(n, F_{2^{32}})$, case III

	length of the word				
n	16	32	64	128	256
16	6544	6544	6544	6544	6544
32	50720	50720	50720	50720	50720
64	399424	399424	399424	399424	399424
128	3170432	3170432	3170432	3170432	3170432

Table 4. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph $A(n, F_{2^{32}})$, case I

	length of the word				
n	16	32	64	128	256
16	250	250	250	250	250
32	770	1010	1010	1010	1010
64	1810	3074	4066	4066	4066
128	3890	7202	12290	16322	16322

Table 5. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph $A(n, F_{2^{32}})$, case II

	length of the word				
n	16	32	64	128	256
16	5623	5623	5623	5623	5623
32	53581	62252	62252	62252	62252
64	454375	680750	781087	781087	781087
128	3607741	6237144	9519921	10826616	10826616

Table 6. Number of monomial terms of the cubic map induced by the graph $A(n, F_{2^{32}})$, case III

	length of the word				
n	16	32	64	128	256
16	6544	6544	6544	6544	6544
32	50720	50720	50720	50720	50720
64	399424	399424	399424	399424	399424
128	3170432	3170432	3170432	3170432	3170432

7. Conclusion

The paper is dedicated to feasibility studies for two families of multivariate public keys which use the transformations of linear degree $O(n)$ of n -dimensional affine spaces over F_q and Z_q where $q=2^{32}$. These cryptosystems use Eulerian transformations which have degree $O(n)$ and convert each variable x_i to a monomial term. The cryptosystem based on the composition of Eulerian and cubic transformations were introduced in [7] and [8]. They attracted attention of some cryptanalysts in Ukraine. Each of these cryptosystems is implemented in cases of extremal graphs $D(n, K)$ and $A(n, K)$ where K is finite field or arithmetical ring.

During 9 years period after the publications cryptanalytical instruments to break these cryptosystem were not found. Recently [9] the serious obfuscations of these public key were suggested. The cubic maps with cubic inverses were substituted by cubic maps with inverses of high degree. Computer simulations demonstrate that the density of obfuscated schemes are the same with densities of original schemes.

The idea to use loaded tables for powers of regular elements make the implementation feasible task. It requires essential memory in the cases of a large field or large arithmetic ring but for modern computers it is not a problem.

Noteworthy that users can work with nonbijective transformation via the change of bijective linear transformation for injective linear map from K^n to K^t where $t > n$.

This modification can be useful for the realisation of digital signatures procedures.

We are going to present described algorithms for the state certification in Ukraine.

REFERENCES

1. Post-Quantum Cryptography: Call for Proposals: <https://csrc.nist.gov/Project/Post-Quantum-Cryptography-Standardization/Call-for-Proposals>, Post-Quantum Cryptography: Round 2 Submissions.
2. M. Andrzejczak, The Low –Area FPGA Design for the Post – Quantum Cryptography Proposal Round 5, Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS), Cryptography and Security Systems, Leipzig, September, 2019 (to appear).
3. R. J. McEliece, A Public-Key Cryptosystem Based On Algebraic Coding Theory (1978), DSN Progress Report, 44: 114–116.
4. Anne Canteaut, François-Xavier Standaert (Eds.), Eurocrypt 2021, LNCS 12696, 40th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques Zagreb, Croatia, October 17–21, 2021, Proceedings, Part I, Springer, 2021, 839 p.
5. V. Ustimenko, U. Romanczuk-Polubiec, A. Wroblewska, M. Polak, E. Zhupa, On the constructions of new symmetric ciphers based on non-bijective multivariate maps of prescribed degree, Security and Communication Networks, Volume 2019, Article ID 2137561, 15 pages <https://doi.org/10.1155/2019/2137561>
6. V. Ustimenko, Graphs in terms of Algebraic Geometry, symbolic computations and secure communications in Post-Quantum world, UMCS Editorial House, Lublin, 2022, 198 p.
7. V. Ustimenko, On new multivariate cryptosystems based on hidden Eulerian equations, Dopov. Nath Acad of Sci, Ukraine, 2017. № 5, pp 17-24.
8. V. Ustimenko, On new multivariate cryptosystems based on hidden Eulerian equations over finite fields, Cryptology ePrint Archive, 093, 2017.
9. Vasyl Ustimenko, On Extremal Algebraic Graphs and Multivariate Cryptosystems IACR e-print archive, 2022/1537.
10. V. Ustimenko, On new symbolic key exchange protocols and cryptosystems based on hidden tame homomorphism. Dopovidi. NAS of Ukraine, 2018, n 10, pp. 26-36.
11. V. Ustimenko, On the families of stable transformations of large order and their cryptographical applications, Tatra Mt. Math. Publ., 70 (2017), 107-117.
12. V. Ustimenko, On desynchronised multivariate El Gamal algorithm, Cryptology ePrint Archive, 712, 2017.
13. V. Ustimenko, M. Klisowski, On Noncommutative Cryptography with cubical multivariate maps of predictable density, In “Intelligent Computing”, Proceedings of the 2019 Computing Conference, Volume 2, Part of Advances in Intelligent Systems and Computing (AISC, volume 998), pp. 654-674.
14. V. Ustimenko, On desynchronised multivariate algorithms of El Gamal type for stable semigroups of affine Cremona group, Theoretical and Applied Cybersecurity, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, vol 1, 2019, pp 22-30.
15. V. Ustimenko, On the usage of postquantum protocols defined in terms of transformation semigroups and their homomorphisms, Theoretical and Applied Cybersecurity, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”, Volume 1, No. 2, pp. 32-44 (2020).
16. V. Ustimenko, On the families of stable transformations of large order and their cryptographical applications, Tatra Mt. Math. Publ., 70 (2017), pp. 107-117.
17. V. Ustimenko, M. Klisowski On $D(n; q)$ quotients of large girth and hidden homomorphism based cryptographic protocols. FedCSIS (Communication Papers) 2022: pp. 199-206.
18. Alexei G. Myasnikov; Vladimir Shpilrain and Alexander Ushakov (2011), Non-commutative Cryptography and Complexity of Group-theoretic Problems, American Mathematical Society.

19. F. Lazebnik, V. Ustimenko, *Some Algebraic Constructions of Dense Graphs of Large Girth and of Large Size*, DIMACS series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science, v. 10, (1993) pp. 75-93.
20. F. Lazebnik, V. Ustimenko and A.J. Woldar, A new series of dense graphs of high girth, *Bulletin of the AMS* 32 (1) (1995), pp. 73-79.
21. V. Ustimenko, On new results on Extremal Graph Theory, Theory of Algebraic Graphs and their applications in Cryptography and Coding Theory, Reports of Natl. Acad. of Sci. of Ukraine, 2022, No. 4, pp. 42-49.
22. Yu. Bodnarchuk, Every regular automorphism of the affine Cremona group is inner, *Journal of Pure and Applied Algebra* 157 (2001), pp. 115-119.
23. I.R. Shafarevich, On some infinite dimension groups II, *Izv. Akad. Sci. Ser. Math.* 2 (1) (1981), pp. 214-226.
24. M. Noether, Luigi Cremona, *Mathematische Annalen*, 59 (1904), pp. 1-19.
25. V. Ustimenko, Maximality of affine group, hidden graph cryptosystem and graph's stream ciphers, *Journal of Algebra and Discrete Mathematics*, 2005, v.1, pp 51-65.
26. O. Zariski, P. Samuel, *Commutative algebra*, 2, Springer (1975).
27. I.R. Shafarevich, *Basic algebraic geometry*, Springer (1977).
28. R. Hartshorne, *Algebraic geometry*, Springer (1977).
29. B. Bollobás, *Extremal Graph Theory*. London: Academic Press, 1978, 440 P.
30. V. A. Ustimenko, Linguistic Dynamical Systems, Graphs of Large Girth and Cryptography, *Journal of Mathematical Sciences*, Springer, vol. 140, N 3 (2007), pp. 412-434.
31. V. Ustimenko, On the families of algebraic graphs with the fastest growth of cycle indicator and their applications, IACR e-print archive 2022/1668.
32. R. Wagner, M. R. Magyarik, "A Public-Key Cryptosystem Based on the Word Problem", *Advances in Cryptology, Proceedings of CRYPTO'84*, Santa Barbara, California, USA, August 19-22, 1984.
33. D. N. Moldovyan and N.A. Moldovyan, A New Hard Problem over Non-commutative Finite Groups for Cryptographic Protocols, *International Conference on Mathematical Methods, Models, and Architectures for Computer Network Security, MMM-ACNS 2010: Computer Network Security* pp 183-194.
34. L. Sakalauskas, P. Tvarijonas and A. Raulynaitis, Key Agreement Protocol (KAP) Using Conjugacy and Discrete Logarithm Problem in Group Representation Level, *INFORMATICA*, 2007, vol. 18, No 1, pp. 115-124.
35. V. Shpilrain, A. Ushakov, The conjugacy search problem in public key cryptography: unnecessary and insufficient, *Applicable Algebra in Engineering, Communication and Computing*, August 2006, Volume 17, Issue 3-4, pp. 285-289.
36. Delaram Kahrobaei and Bilal Khan, A non-commutative generalization of ElGamal key exchange using polycyclic groups, In *IEEE GLOBECOM 2006-2006 Global Telecommunications Conference* [4150920] DOI: 10.1109/GLOCOM.2006
37. Alexei Myasnikov; Vladimir Shpilrain and Alexander Ushakov (2008), *Group-based Cryptography*, Berlin: BirkhäuserVerlag.
38. Zhenfu Cao (2012), *New Directions of Modern Cryptography*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 978-1-4665-0140-9.
39. Benjamin Fine, et. al. "Aspects of Non abelian Group Based Cryptography: A Survey and Open Problems", arXiv:1103.4093.
40. I. Anshel, M. Anshel and D. Goldfeld, An algebraic method for public-key cryptography. *Math. Res. Lett.* 6(3-4), pp. 287-291 (1999).
41. S.R. Blackburn and S.D. Galbraith, Cryptanalysis of two cryptosystems based on group actions. In: *Advances in Cryptology—ASIACRYPT '99. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1716, pp. 52-61. Springer, Berlin (1999).
42. K.H. Ko, S.J. Lee, J.H. Cheon, J.W. Han, J.S. Kang and C. Park, New public-key cryptosystem using braid groups. In: *Advances in Cryptology—CRYPTO 2000*, Santa Barbara, CA. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 1880, pp. 166-183. Springer, Berlin (2000).

43. G. Maze, C. Monico and J. Rosenthal, Public key cryptography based on semigroup actions, *Adv. Math. Commun.* 1(4), pp. 489–507 (2007).
44. P.H. Kropholler and S.J. Pride, W.A.M. Othman K.B. Wong, P.C. Wong, Properties of certain semigroups and their potential as platforms for cryptosystems, *Semigroup Forum* (2010) 81: pp. 172–186.
45. J.A. Lopez Ramos, J. Rosenthal, D. Schipani and R. Schnyder, Group key management based on semigroup actions, *Journal of Algebra and its applications*, vol. 16 (to appear in 2019).
46. Gautam Kumar and Hemraj Saini, Novel Noncommutative Cryptography Scheme Using Extra Special Group, *Security and Communication Networks*, Volume 2017, Article ID 9036382, 21 pages, <https://doi.org/10.1155/2017/9036382>
47. V. Ustimenko, U. Romańczuk, On Extremal Graph Theory, Explicit Algebraic Constructions of Extremal Graphs and Corresponding Turing Encryption Machines, in "Artificial Intelligence, Evolutionary Computing and Metaheuristics", In the footsteps of Alan Turing Series: Studies in Computational Intelligence, Vol. 427, Springer, 2013, Volume 427, pp. 257–285.
48. V. A. Roman'kov, A nonlinear decomposition attack, *Groups Complex. Cryptol.* 8, No. 2 (2016), 197–207.
49. V. Roman'kov, An improved version of the AAG cryptographic protocol, *Groups Complex. Cryptol.* 11, No. 1 (2019), 35–42.
50. A. Ben-Zvi, A. Kalka and B. Tsaban, Cryptanalysis via algebraic span, In: Shacham H. and Boldyreva A. (eds.) *Advances in Cryptology - CRYPTO 2018 - 38th Annual International Cryptology Conference*, Santa Barbara, CA, USA, August 19–23, 2018, Proceedings, Part I, Vol. 10991, 255–274, Springer, Cham (2018).
51. B. Tsaban, Polynomial-time solutions of computational problems in noncommutative-algebraic cryptography, *J. Cryptol.* 28, No. 3 (2015), 601–622.
52. V. Roman'kov, Cryptanalysis of a new version of the MOR scheme, arXiv:1911.00895.
53. V. Roman'kov, Cryptanalysis of two schemes of Baba et al. by linear algebra methods. CoRR abs/1910.09480 (2019).
54. N. Koblitz, *Algebraic aspects of cryptography*, Springer (1998), 206 p.
55. L. Goubin, J. Patarin and Bo-Yin Yang, Multivariate. Cryptography, *Encyclopedia of Cryptography and Security*, (2nd Ed.) 2011, 824–828.
56. Billet O, Patarin J, Seurin Y (2008) Analysis of intermediate field systems. In: *Proceedings of SCC 2008*, Beijing.
57. Chen AI-T, Chen M-S, Chen T-R, Cheng C-M, Ding J, Kuo EL-H, Lee FY-S, Yang B-Y. (2009) SSE Implementation of multivariate PKCs on modern x86 CPUs. In: *Proceedings of CHES 2009. Lecture notes in computer science*, vol 5747, pp 33–48.
58. Courtois NT (2001) Efficient zero-knowledge authentication based on a linear algebra problem MinRank. In: *Proceedings of ASIACRYPT 2001. Lecture notes in computer science*, vol 2248. Springer, pp 402–421.
59. Courtois NT, Goubin L, Patarin J (2001) QUARTZ, 128-bit long digital signatures. In: *Proceedings of CT-RSA 2011. Lecture notes in computer science*, vol 2020. Springer, pp 282–297.
60. Ding J, Dubois V, Yang B-Y, Chen C-H, Cheng C-M (2008) Can SFLASH be repaired. In: *Proceedings of ICALP 2008. Lecture notes in computer science*, vol 5126. Springer, pp 691–701.
61. Ding J, Schmidt D (2005) Rainbow, a new multivariable polynomial signature scheme. In: *Proceedings of ACNS 2005. Lecture notes in computer science*, vol 3531. Springer, pp 164–175.
62. Ding J, Werner F, Yang B-Y, Chen C-H, Chen M-S (2008) Odd-char multivariate hidden field equations, *Cryptology e-print archive report* 2008/543 version 20081229:161921.
63. Ding J, Wolf C, Yang B-Y (2007) $\ell\ell$ -Invertible Cycles for Multivariate Quadratic (MQ) Public Key Cryptography. In: *Proceedings of PKC 2007. Lecture notes in computer science*, vol 4450, pp 266–281.

64. Ding J, Yang B-Y, Chen C-H, Chen M-S, Cheng C-M (2008) New differential-algebraic attacks and reparametrization of rainbow. In: Proceedings of ACNS 2008. Lecture notes in computer science, vol 5037, pp 242–257.
65. Ding J, Yang B-Y (2009) Multivariate public-key cryptography. In: Bernstein DJ, Buchmann J, Dahmen E (eds) Post-quantum cryptography. Springer, ISBN: 978-3-540-88701-0, e-ISBN: 978-3-540-88702-7.
66. Dubois V, Fouque P-A, Shamir A, Stern J (2007) Practical cryptanalysis of SFLASH. In: Proceedings of Crypto 2007. Lecture notes in computer science, vol 4622, pp 1–12.
67. Faugère J-C, Joux A (2003) Algebraic cryptanalysis of hidden field equation (HFE) Cryptosystems using Gröbner bases. In: Proceedings of Crypto 2003. Lecture notes in computer science, vol 2729, pp 44–60.
68. Faugère J-C, Perret L (2006) Polynomial equivalence problems – algorithmic and theoretical aspects. In: Proceedings of Eurocrypt 2006. Lecture notes in computer science, vol 4004. Springer, pp 30–47.
69. Kipnis A, Patarin J, Goubin L (1999) Unbalanced oil and vinegar signature schemes. In: Proceedings of Eurocrypt’99. Lecture notes in computer science, vol 1592. Springer, pp 206–222.
70. Kipnis A, Shamir A (1998) Cryptanalysis of the oil and vinegar signature scheme. In: Proceedings of CRYPTO’98. Lecture notes in computer science, vol 1462, pp 257–266.
71. Matsumoto T, Imai H, Harashima H, Miyakawa H (1983) A class of asymmetric cryptosystems using obscure representations of enciphering functions. In: Proceedings of the 1983 national convention record on information systems, IECE Japan.
72. Matsumoto M, Imai H (1986) Algebraic methods for constructing asymmetric cryptosystems. In: Proceedings of the 3rd international conference on Algebraic Algorithms and Error-Correcting Codes (AAECC-3), Grenoble, France, 15-19 July 1985. Lecture notes in computer science, vol 229. Springer, pp 108–119.
73. Matsumoto M, Imai H (1988) Public quadratic polynomial-tuples for efficient signature verification and message-encryption. In: Proceedings of Eurocrypt’88. Lecture notes in computer science, vol 330. Springer, pp 419–545.
74. Patarin J (1995) Cryptanalysis of the Matsumoto and Imai public key scheme of Eurocrypt’88. In: Proceedings of CRYPTO’95. Lecture notes in computer science, vol 963. Springer, pp 248–261.
75. Patarin J (1996) Hidden fields equations (HFE) and isomorphisms of polynomials (IP): two new families of asymmetric algorithms. In: Proceedings of Eurocrypt’96. Lecture notes in computer science, vol 1070. Springer, pp 33–48.
76. Patarin J, Courtois N, Goubin L (2001) FLASH, a Fast Multivariate Signature Algorithm. In: Proceedings of the conference on topics in cryptology: the cryptographer’s track at RSA. Lecture notes in computer science, vol 2020, Springer, pp 298–307.
77. Tsujii S, Itoh T, Fujioka A, Kurosawa K, Matsumoto T (1988) A public-key cryptosystem based on the difficulty of solving a system of nonlinear equations. Syst Comput Jpn 19:10–18.
78. Yang B-Y, Chen J-M, Chen Y-H (2004) TTS: high-speed signatures on a low-cost smart card. In: Proceedings of CHES 2004. Lecture notes in computer science, vol 3156. Springer, pp 371–385.
79. V. Ustimenko, O. Pustovit, T. Svyrydenjo. On the stream ciphers based on the hidden algebraic graphs, CPITS II 2025, pp. 358-365, <https://ceur-ws.org/Vol-4145/short3.pdf#80>
80. V. Ustimenko, O. Pustovit, (2023). On security of GIS systems with N-tier architecture and family of graph based ciphers. Екологічна безпека та природокористування, 47 (3), 113-132. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.113-132>
81. T. Chojecki, G. Erskine, J. Tuite, V. Ustimenko, On Affine Forestry over Integral Domains and Families of Deep Jordan–Gauss Graphs, Eur. J. Math., 11(10) (2025). doi:10.1007/s40879-024-00798-2

The article was received 12.01.2026, received after revision 23.02.2026, accepted 26.03.2026

В.О. Устименко, О.С. Пустовіт

ПРО ЕКСТРЕМАЛЬНІ АЛГЕБРАЇЧНІ ГРАФИ, ЕЙЛЕРОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЇ БАГАТОВИМІРНИХ КРИПТОСИСТЕМ

Анотація. Представлено результати імплементації кількох відкритих ключів криптографії від багатьох змінних лінійного ступеня розміру $O(n)$ та поліноміальної густини, визначених над комутативним кільцем K з нетривіальною мультиплікативною групою K^* . Простір відкритих текстів цих криптосистем дорівнює $(K^*)^n$, а простір шифрограм – K^n . Відображення шифрування є обмеженням на $(K^*)^n$ поліноміального перетворення простору K^n , що є композицією спеціального Ейлерівського перетворення з кубічним перетворенням криптографії від багатьох змінних вигляду T_1QT_2 , де T_1 і T_2 – афінні бієктивні перетворення, а Q – нелінійне перетворення, визначене шляхом на алгебраїчному дводольному графі, точки і прямі якого утворюють афінний простір K^n .

Схема реалізована для випадків $K=F_q$ і $K=Z_q$, $q=2^{32}$. Знання приватного ключа дозволяє розшифрувати повідомлення від публічного користувача за час $O(n^2)$. Криптосистеми є узагальненнями алгоритмів, запропонованих 9 років тому, криптоаналіз для яких невідомий. Задача зламання криптосистеми еквівалентна системі нелінійних рівнянь від n змінних ступеня sp , де $s>0$. Комп'ютерних пакетів для дослідження таких систем не розроблено.

Ключові слова: криптографія від багатьох змінних, символічні обчислення, алгебраїчні графи, теорія екстремальних графів.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2026, надійшла після рецензування 23.02.2026, прийнята 26.03.2026

Устименко Василь Олександрович

доктор фізико-математичних наук, професор, завідуючий відділу інформаційної безпеки Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Visiting Professor of Royal Holloway University of London, vasyk.ustymenko@rhul.ac.uk

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2138-2357> **e-mail:** vasulustymenko@yahoo.pl

Пустовіт Олександр Сергійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3232-1787> **e-mail:** sanyk_set@ukr.net

УДК 004.91:004.62

Oleksandr Terentiev, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Principal researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

Tetyana Prosyankina-Zharova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, senior researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.pruman@gmail.com

Yurii Abroskin, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9828-5596> **e-mail:** abroskin21@gmail.com

Volodymyr Duda, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4278-4635> **e-mail:** dudavolodimir@gmail.com

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

ANALYSIS METHODOLOGY OF PRO-KREMLIN DESINFORMATION IN INTERNET NEWS ARTICLES

Abstract. *The article proposes and implements a methodology for analyzing pro-Kremlin disinformation in Internet sources based on the integration of automated data collection, natural language processing methods, topic modeling, and statistical analysis. The study utilized an open multilingual dataset containing 18,249 links to web articles in 42 languages, developed within the framework of the European anti-disinformation initiatives VERA.AI and EUvsDisinfo. The proposed methodology includes the stages of automated extraction of texts from web resources, text preprocessing, language filtering, thematic clustering, and the development of classification models using the SAS Text Miner system. For automated collection of textual content, a specialized Python-based software application was developed using the PLAYWRIGHT and ASYNCIO libraries, optimized for high-performance processing of large-scale web article corpora. The results of the study revealed a significant relationship between the type of content, the language of the source, and the necessity of VPN access for retrieving texts. The Pearson chi-square statistic was 8847 with 10 degrees of freedom and a p -value < 0.000001 , indicating a high statistical significance of the obtained results. It was found that Russian-language disinformation resources in most cases require the use of VPN access due to sanctions and geographical access restrictions, whereas trustworthy English-language and Ukrainian-language sources demonstrate substantially higher openness and accessibility stability. Thematic analysis showed that pro-Kremlin disinformation is concentrated around anti-Ukrainian, anti-NATO, and conspiracy-oriented narratives, demonstrating high thematic repetition and characteristics of coordinated FIMI campaigns. The proposed methodology can be applied in the fields of information security, OSINT analytics, information space monitoring, and the development of automated disinformation detection systems.*

Keywords: *FIMI, Foreign Information Manipulation and Interference, OSINT, Open Source Intelligence, fake news detection, SAS, chi-square statistic.*

О.М. Терентьев, Т.І. Просянкина-Жарова, Ю.Ю. Аброскін, В.О. Дуда

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

МЕТОДИКА АНАЛІЗУ ПРОКРЕМЛІВСЬКОЇ ДЕЗІНФОРМАЦІЇ В ДЖЕРЕЛАХ МЕРЕЖІ ІНТЕРНЕТ

Анотація. У статті запропоновано та реалізовано методику аналізу прокремлівської дезінформації в джерелах мережі Інтернет, що базується на поєднанні автоматизованого збору даних, методів обробки природної мови, тематичного моделювання та статистичного аналізу. Для проведення дослідження використано відкритий багатомовний набір даних, який містить 18 249 посилань на веб-статті 42 мовами та сформований у межах європейських ініціатив протидії дезінформації VERA.AI та EUvsDisinfo. Запропонована методика включає етапи автоматизованого вивантаження текстів із веб-ресурсів, попередньої обробки текстових даних, мовної фільтрації, тематичної кластеризації та побудови моделей класифікації із використанням системи SAS Text Miner. Для автоматизованого збору текстового контенту було розроблено спеціалізовану програму мовою Python із використанням бібліотек PLAYWRIGHT та ASYNCIO, оптимізовану для високопродуктивної обробки великих масивів веб-статей.

У результаті дослідження встановлено суттєву залежність між типом контенту, мовою джерела та необхідністю використання VPN-доступу для отримання текстів. Значення статистики χ^2 -квадрат Пірсона становило 8847 при 10 ступенях свободи та $p\text{-value} < 0,000001$, що свідчить про високу статистичну значущість отриманих результатів. Виявлено, що російськомовні дезінформаційні ресурси у більшості випадків потребують використання VPN через санкційні та географічні обмеження доступу, тоді як правдиві англійськомовні та українськомовні джерела характеризуються значно вищою відкритістю та стабільністю доступу. Тематичний аналіз показав, що прокремлівська дезінформація концентрується навколо антиукраїнських, антинатовських та конспірологічних наративів, демонструючи високу повторюваність та ознаки координованих FIMI-кампаній. Запропонована методика може бути використана у задачах інформаційної безпеки, OSINT-аналітики, моніторингу інформаційного простору та побудови систем автоматичного виявлення дезінформації.

Ключові слова: FIMI, Іноземне інформаційне маніпулювання та втручання, OSINT, аналіз відкритих джерел інформації, виявлення дезінформацій, SAS, статистика χ^2 -квадрат Пірсона.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.154-160>

Вступ

Сучасний розвиток цифрових технологій та глобалізація інформаційного простору призвели до появи нових актуальних загроз масового поширення дезінформації, маніпулятивного контенту та координованих інформаційних операцій. Все це становить особливу небезпеку та загрозу на тлі військової агресії, в рамках якої прокремлівська дезінформація використовується як інструмент інформаційно-психологічного впливу, який призводить до формування небезпечних суспільних настроїв, дискредитує органи державної влади та призводить до послаблення міжнародної підтримки України.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення ефективних підходів для аналізу дезінформаційних матеріалів, здатних працювати з великими масивами неструктурованих текстових даних. В даній роботі запропоновано методику аналізу прокремлівської дезінформації в джерелах мережі Інтернет, що включає автоматизоване вивантаження текстових даних, їх попередню обробку та тематичний аналіз із використанням системи SAS Text Miner. Методика базується на використанні відкритого багатомовного набору даних, сформованого в межах європейських дослідницьких ініціатив у сфері протидії дезінформації, та орієнтована на виявлення інформаційних наративів, оцінку доступності джерел, аналіз мовних особливостей контенту й статистичне підтвердження виявлених закономірностей. Отримані результати можуть бути використані у системах моніторингу інформаційного простору, OSINT-дослідженнях, задачах інформаційної безпеки та побудові моделей автоматичного виявлення дезінформації.

Опис методики аналізу прокремлівської дезінформації в джерелах мережі Інтернет

В рамках дослідження було запропоновано та реалізовано методику аналізу прокремлівської дезінформації в джерелах мережі Інтернет, що складається з наступних етапів.

1. Формування списку джерел, що підлягають дослідженню, або підписка на спеціалізовані агрегатори новин в мережі Інтернет [1, 2].

2. Вивантаження даних з мережі Інтернет, в автоматизованому режимі з метою отримання текстового вмісту веб-статей за URL-посиланнями з набору даних та збереження результатів у структурованому форматі [3, 4, 5].

3. Попередня обробка текстів із використанням системи SAS Text Miner [6, 7], після вивантаження, що включає наступні кроки.

3.1. Очистка текстів від HTML-тегів, рекламних блоків, службових символів, дублікатів, навігаційних елементів, стоп-слів [6].

3.2. Нормалізація тексту, що включає токенизацію, лематизацію, стемінг, уніфікація кодування [6].

3.3. Мовна фільтрація, після якої із загального корпусу залишаються англійська, українська та російська мови. Це дозволяє зменшити обчислювальні витрати, звузити предмет дослідження та підвищити якість кластеризації [6, 7].

4. Аналіз текстів із використанням спеціалізованих модулів та компонентів системи SAS Text Miner [6]. Для виявлення інформаційних наративів використовуються інструменти тематичного моделювання, кластеризації та аналіз латентних семантичних структур [6, 7].

5. Статистичний аналіз результатів. На цьому етапі проводиться оцінка частоти появи наративів, аналіз мовних відмінностей, аналіз доступності джерел, оцінка залежності між мовою та типом блокування. Для статистичного підтвердження гіпотез можуть використовуватися критерій хі-квадрат Пірсона, кореляційний аналіз, аналіз частот та дисперсійний аналіз.

Опис вхідного набору даних для дослідження

Однією із проблем при проведенні досліджень є наявність вже розмічених даних, тому для аналізу та побудови моделей було взято готовий розмічений набір даних [1], що містить 18 249 посилань на статті в мережі Інтернет, при

цьому це багатомовний файл, що включає 42 різні мови. Цей набір даних [1] можна отримати у відкритому доступі, за посиланням в мережі Інтернет: <https://zenodo.org/records/10514307>.

Зауважимо, що ці дані збиралися протягом майже 9 років, починаючи з січня 2015 по серпень 2023 року, колективом авторів, в рамках спеціальної європейської ініціативи VERA.AI за підтримки проєкту Horizon Europe.

Цей ресурс [1] призначений для досліджень проблем дезінформації, задач обробки природної мови та машинного навчання, побудови моделей виявлення дезінформацій, аналізу інформаційних операцій, вивчення прокремлівських наративів на 42 мовах.

Окрім цього, це дослідження [1] тісно пов'язано з іншим дослідницьким проєктом EUvsDisinfo [2], що є флагманським проєктом Європейської служби зовнішніх дій (EEAS – European External Action Service), створений для виявлення, аналізу та протидії дезінформаційним кампаніям, насамперед прокремлівським інформаційним операціям. Зазначений проєкт реалізується командою “Східна оперативна група зі стратегічних комунікацій ЄС” (East StratCom Task Force), яка в свою чергу фактично є одним із перших наддержавних центрів Європи, що системно займається аналізом дезінформації, інформаційною безпекою, цифровими інформаційними операціями, FIMI-аналітикою (Foreign Information Manipulation and Interference) та OSINT-моніторингом.

Програмна реалізація деяких етапів методики аналізу прокремлівської дезінформації в джерелах мережі Інтернет

Спеціально для вирішення задачі по вивантаженню даних з усіх Інтернет-джерел, що наведені у наборі даних [1], колективом авторів було розроблено спеціалізовану програму на мові програмування Python, з якою можна ознайомитися на GitHub [3]. Програма реалізує асинхронний конвеєр обробки тексту для масового автоматизованого збору даних з веб-сайтів (HTML-документів) із використанням бібліотек PLAYWRIGHT [4] та ASYNCIO [5]. Архітектура системи оптимізована для високопродуктивного завантаження великих корпусів веб-статей і придатна для задач обробки природних мов, аналізу відкритих джерел інформації (OSINT, Open Source Intelligence), текстової аналітики та аналізу дезінформаційних кампаній.

Після попереднього розвідувального аналізу текстів було прийнято рішення з 42 мов зазначеного набору даних [1] залишити лише три – англійську, російську та українську, для того щоб звузити дослідницьку задачу та зменшити час на аналіз та обчислення.

На рисунку наведена стандартна схема технологічного процесу, що містить етапи та модулі:

1. Завантаження даних, як з мережі Інтернет по вказаних джерелах, так і з локального диску комп'ютера.
2. Парсинг тексту, перетворення неструктурованого тексту у дані, придатні для обробки програмою.
3. Фільтрація тексту, попередня обробка, під час якої видаляються непотрібні слова, очищуються текстові дані, зменшується шум, залишаються лише інформативні терміни для подальшого аналізу.

4. Кластеризація тексту, автоматичне групування у кластери на основі їх тематичної або статистичної подібності.

5. Модуль побудови текстових правил, призначений для автоматичного створення правил класифікації текстів, на основі виявлення закономірностей у документах, з послідовною побудовою моделей прогнозування на основі тексту.

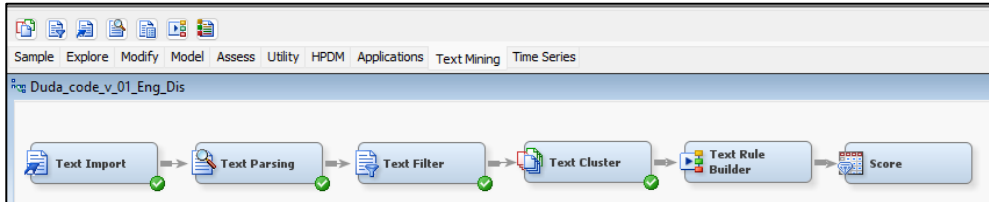


Рисунок 1. Стандартна схема технологічного процесу для аналізу текстової інформації в системі SAS Text Miner

Основною задачею наведеної на рис. 1 технологічної схеми процесу є виявлення повторюваних пропагандистських тез, координації наративів, тематичних груп дезінформації. Для чого модуль кластеризації дозволяє автоматично групувати документи, виявляти схожі інформаційні кампанії, визначати центри тематичних кластерів. Типові кластери можуть включати антиукраїнські наративи, антинаївську риторику, маніпуляції щодо санкцій, дискредитацію західних медіа, дезінформацію щодо військових подій.

Побудова моделей класифікації, із використанням модуля побудови текстових правил, дозволяє будувати правила класифікації, виявляти ключові терміни дезінформації та оцінювати інформативність ознак, для чого можуть використовуватися дерева рішень, регресійні моделі, TF-IDF метод та ентропійного зважування [6, 7].

Аналіз отриманих результатів дослідження

При вивантаженні текстів за посиланнями в мережі Інтернет було з'ясовано, що близько 43% інтернет-джерел вивантажується без будь-яких проблем, 42,29% можна вивантажити, лише використовуючи VPN-з'єднання, а 14,67% джерел взагалі було видалено. Зазначимо, що VPN (Virtual Private Network – віртуальна приватна мережа) – це технологія, яка створює зашифрований тунель між пристроєм і віддаленим сервером.

Найбільша кількість заблокованого та видаленого контенту припадає саме на той, що класифіковано як дезінформація на англійській та російській мовах. В таблиці 1 наведена більш детальна інформація з розбивкою по мовах та категоріях (правдива інформація чи дезінформація).

Значення статистики хі-квадрат Пірсона, для результатів наведених в таблиці 1, дорівнює 8847, при кількості ступенів свободи 10, та значенням p-value меншим за 0,000001. Значення хі-квадрат є надзвичайно великим і статистично значущим, що в сукупності означає, що існує дуже сильна залежність між типом контенту, мовою контенту та необхідністю використання VPN. Найбільший внесок у значення статистики хі-квадрат дають: російська дезінформація, по причині надзвичайно високого відсотку

необхідності VPN-доступу (86,7%); правдивість інформації із англomовних джерел, через дуже високу відкриту доступність без використання VPN (76%); правдивість інформації із україномовних джерел через майже повну відкритість ресурсів (94%).

Таблиця 1. Кількість статей для різних мов, що було вивантажено з мережі Інтернет без використання та з використанням VPN, а також процент видалених статей

Мова джерела	Категорія	Кількість новин у наборі даних	Процент статей, що вивантажені без використання VPN	Процент статей, що вивантажені із використанням VPN	Процент видалених статей
Англійська	правдива інформація	6121	76,44	4,313	19,25
Англійська	дезінформація	425	25,65	62,82	11,53
Російська	правдива інформація	469	53,31	40,94	5,76
Російська	дезінформація	5356	2,427	86,71	10,87
Українська	правдива інформація	315	93,65	0,634	5,71
Українська	дезінформація	56	56	0	0

Більшість правдивих англomовних статей доступні напряму (76%), мають високу стабільність доступу, що свідчить про використання провідних перевірених засобів масової інформації та відсутності геоблокувань.

Окремо необхідно відмітити той факт, що 19% статей, що відносяться до правдивих, протягом останніх років було видалено або недоступні. Для великих англomовних ресурсів це природний процес, пов'язаний із появою платного доступу до архівних матеріалів, видаленням дублюючих посилань, зміною URL внаслідок міграції ресурсів та реструктуризації, зміною у налаштуванні правил безпеки (захист від DDoS-атак та ботів), а також видаленням застарілих новин. Між тим англomовні ресурси, що позначені як дезінформаційні, потребують використання VPN у 62%, по причині геоблокування регіонального обмеження та обмеження доступу за IP.

Правдиві російськомовні джерела доступні лише в 53%, а в 40% потребують вже використання VPN, що пов'язано із санкційними та регіональними обмеженнями та частковим блокуванням незалежних медіа. В той час як дезінформаційні російськомовні джерела доступні лише в 2,4%, а для 86,7% необхідне використання VPN, що пов'язано в першу чергу із санкційним блокуванням на рівні держави доменів та розгортанням інфраструктури обмеження доступу в ЄС та Україні.

Аналіз текстів за тематиками та наративами показали наступні основні результати. Російськомовна дезінформація концентрується навколо геополітичних конфліктів, активно використовує антинаївські, антиукраїнські та конспірологічні наративи, демонструє ознаки

скоординованих FIMI-кампаній, має значно вищий рівень тематичної повторюваності та емоційної поляризації. В той час як правдива інформація характеризується більшою тематичною різноманітністю, орієнтована на політичну та суспільну аналітику, містить менше конфліктно-пропагандистських конструкцій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Leite, J., Razuvaevskaya, O., Bontcheva, K., & Scarton, C. (2024). *EUvsDisinfo: A dataset for multilingual detection of pro-Kremlin disinformation in news articles* [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10492913>
2. *EUvsDisinfo: Official website*. (n.d.). <https://euvsdisinfo.eu/>
3. Duda, V., & Terentiev, O. (n.d.). *Program for download EUvsDisinfo* [GitHub repository]. GitHub. https://github.com/oterentiev/download_EUvsDisinfo
4. *Playwright: Browser automation library website*. (n.d.). <https://playwright.dev/>
5. Python Software Foundation. (n.d.). *Asyncio – Asynchronous I/O: Python 3 documentation*. <https://docs.python.org/3/library/asyncio.html>
6. Jade, T., Belamaric-Wilsey, B., & Wallis, M. (2019). *SAS text analytics for business applications* (1st ed.): Concept rules for information extraction models. SAS Press. <https://sasinstitute.redshelf.com/book/1878372>
7. Terentiev, O. M., Duda, V. O., Abroskin, Yu. Yu., & Prosyankina-Zharova, T. I. (2026). Analysis of text analytics methods for knowledge extraction from Ukrainian-language social media. *Environmental Safety and Natural Resources*, 1(57), 161–170. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.1.161-170> [in Ukrainian]

Стаття надійшла до редакції 30.01.2026, надійшла після рецензування 23.03.2026, прийнята 06.04.2026

The article was received 30.01.2026, received after revision 23.03.2026, accepted 06.04.2026

Терентьєв Олександр Миколайович

доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

Просьянкіна-Жарова Тетяна Іванівна

доктор технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9623-8771> **e-mail:** t.pruman@gmail.com

Аброскін Юрій Юрійович

аспірант, Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАНУ

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-9828-5596> **e-mail:** abroskin21@gmail.com

Дуда Володимир Олександрович

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Адреса робоча: бульв. Чоколівський, 13, Київ, Україна, 03186

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-4278-4635> **e-mail:** dudavolodimir@gmail.com

УДК 004.89+779.85+528.8:908

Volodymyr Tymchuk¹, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** v_tymchuk@yahoo.co.uk

Vasyl Trysnyuk², Doctor of Technical Sciences, professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Volodymyr Khudoba³, Candidate of Geographic Sciences, docent
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4472-951X> **e-mail:** khudoba.volodymyr@gmail.com

Andrii Deliatynchuk⁴, Head of Yasinya village community
e-mail: info@yasinya-gromada.gov.ua

¹Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³Ivan Boberskyi Lviv State University of Physical Culture, Lviv, Ukraine

⁴Yasinya village community, Yasinya of Rakhiv district of Zakarpatska oblast, Ukraine

GEO-INFORMATION SUPPORT OF SITUATIONAL AWARENESS IN DECISION-MAKING SYSTEMS FOR SECURITY AND CRISIS ENVIRONMENTS

Abstract. *The study is devoted to solving the relevant scientific and applied problem of forming geospatial databases within decision support systems to ensure situational awareness under conditions of increased uncertainty and risk. The paper considers a comprehensive approach to the development of such systems based on the integration of geoinformation technologies and remote sensing data, particularly from Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite platforms, as well as modern methods of spatiotemporal data processing in ArcGIS and Google Earth Engine environments.*

An information-technological model for the formation of consolidated information is proposed, based on the integration of cognitive, information, and physical domains within a geospatial infrastructure. An approach to structuring geospatial databases according to functional subsystems is substantiated, including experience generalization, baseline static and dynamic conditions, as well as modeling and forecasting of emergency situations. It is demonstrated that the use of satellite data, digital elevation models, and spectral indices improves the completeness and reliability of information support and ensures timely data updating in situational awareness systems.

The obtained results form a scientific and methodological basis for the development of intelligent decision support systems aimed at application in search and rescue operations, environmental monitoring, and safety assurance under natural, technogenic, and wartime impacts.

Keywords: *geographic information systems; remote sensing; situational awareness; decision support systems; geospatial database; search and rescue operations; Sentinel-1; Sentinel-2; SAR; DEM.*

В.Ю. Тимчук¹, В.М. Триснюк², В.В. Худоба³, А.І. Делятинчук⁴

¹Національна академія Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

³Львівський державний університет фізичної культури імені Івана Боберського, м. Львів, Україна

⁴Ясінянська об'єднана територіальна громада Рахівського району Закарпатської області, селище Ясіня, Україна

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА СИТУАЦІЙНОЇ ОБІЗНАНОСТІ В СИСТЕМАХ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗПЕКОВИХ І КРИЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ

Анотація. Роботу присвячено розв'язанню актуального науково-прикладного завдання формування геоінформаційних баз даних у складі систем підтримки прийняття рішень для забезпечення ситуаційної обізнаності в умовах підвищеної невизначеності та ризику. У статті розглянуто комплексний підхід до побудови таких систем на основі інтеграції геоінформаційних технологій, даних дистанційного зондування Землі, зокрема супутникових платформ Sentinel-1 і Sentinel-2, а також сучасних методів обробки просторово-часових даних у середовищах ArcGIS та Google Earth Engine.

Запропоновано інформаційно-технологічну модель формування консолідованої інформації, яка базується на інтеграції когнітивної, інформаційної та фізичної сфер у межах геоінформаційної інфраструктури. Обґрунтовано підхід до структуризації геоінформаційної бази даних за функціональними підсистемами, що охоплюють узагальнення досвіду, сталі та варіативні передумови, а також моделювання і прогнозування надзвичайних ситуацій. Показано, що використання супутникових даних, цифрових моделей рельєфу та спектральних індексів забезпечує підвищення повноти та достовірності інформаційного забезпечення, а також оперативність оновлення даних у системах ситуаційної обізнаності.

Отримані результати формують науково-методичну основу для створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на застосування у задачах пошуково-рятувальних операцій, екологічного моніторингу та забезпечення безпеки в умовах природно-техногенних і воєнних впливів.

Ключові слова: геоінформаційні системи; дистанційне зондування Землі; ситуаційна обізнаність; система підтримки прийняття рішень; геоінформаційна база даних; пошуково-рятувальні операції; Sentinel-1; Sentinel-2; SAR; DEM.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.162-171>

Вступ

Тривалість російсько-української війни (РУВ), що супроводжується об'єктивною невизначеністю щодо її подальшого перебігу та термінів завершення, зумовлює необхідність активного залучення широкого кола суб'єктів до формування системи забезпечення безпеки та оборони держави. Це стосується не лише безпосередньо військових структур, а й наукових та прикладних середовищ, які, навіть не будучи прямо інтегрованими у процеси

протидії збройній агресії, здатні здійснювати системний аналіз даних, отриманих із зон бойових дій, інтерпретувати виявлені закономірності та формувати на їх основі обґрунтовані рішення. Використання підходів узагальнення досвіду (Lesson Identified), а також інтеграція результатів дистанційного зондування Землі, геоінформаційного моделювання та аналітичних інформаційних систем відкривають можливості для створення інтелектуальних інструментів підтримки прийняття рішень, орієнтованих на потреби сектору безпеки і оборони України (СБОУ). Водночас важливою складовою є апробація таких рішень у середовищах, що за своїми характеристиками наближені до бойових умов, зокрема в контексті критичних або екстремальних ситуацій.

До сфер, у межах яких доцільним є впровадження та тестування відповідних інформаційних технологій, належать забезпечення безпеки об'єктів підвищеного ризику, функціонування оперативних штабів із ліквідації наслідків природних і техногенних катастроф, а також організація та проведення пошуково-рятувальних операцій. Саме останні характеризуються найбільшою відповідністю умовам невизначеності, обмеженості ресурсів і необхідності оперативного прийняття рішень, що робить їх ефективним полігоном для апробації геоінформаційних систем, систем ситуаційної обізнаності та інтелектуальних аналітичних платформ.

Пошуково-рятувальні операції можуть реалізовуватися як у спонтанному режимі у відповідь на виникнення надзвичайних подій, так і в межах планової діяльності спеціалізованих служб, зокрема Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Особливості природного середовища, в якому часто здійснюються такі операції, зокрема гірські, лісові, засніжені або важкодоступні території, формують складні умови функціонування, що характеризуються високою динамічністю та багатофакторністю впливів. Низький рівень інфраструктурного забезпечення у таких регіонах підсилює роль інформаційних технологій, зокрема геоінформаційних систем, дистанційного зондування та мобільних сенсорних платформ, які забезпечують збір, обробку та інтеграцію просторово-часових даних для підтримки оперативного управління.

З позицій системного аналізу можна констатувати, що як у середовищі пошуково-рятувальних операцій, так і в умовах бойових дій спостерігається подібність ключових функціональних характеристик, що визначають ефективність управлінських процесів. Йдеться про необхідність формування актуальної ситуаційної обізнаності, прогнозування розвитку подій, оцінювання ризиків, оптимізації використання ресурсів та забезпечення мінімізації часу реагування. У цих умовах особливого значення набуває інтеграція геопросторових даних різної природи в єдині геоінформаційні бази даних, що функціонують як ядро систем підтримки прийняття рішень.

Відповідно до положень теорії складних систем, наявність спільних структурних і функціональних ознак у різних за природою системах обумовлює виникнення подібних закономірностей їх поведінки. Це дозволяє екстраполювати результати досліджень, отриманих у відносно контрольованих цивільних або напівекстремальних умовах, на більш складні середовища, зокрема воєнні. Саме тому використання сфери спортивного та екстремального туризму як моделі для дослідження процесів забезпечення безпеки та підтримки прийняття рішень є науково обґрунтованим. У цьому

контексті геоінформаційні системи, інтегровані з даними дистанційного зондування та алгоритмами інтелектуального аналізу, виступають ключовим інструментом формування інформаційної основи для підвищення ефективності управління, забезпечення безпеки та збереження життя і здоров'я людей у складних природно-техногенних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Застосування геоінформаційних технологій у системах підтримки прийняття рішень та системах ситуаційної обізнаності має тривалу історію розвитку і на сучасному етапі характеризується широким впровадженням у різних галузях, зокрема у сфері безпеки, управління ризиками та екологічного моніторингу. Сучасні дослідження підтверджують, що геоінформаційні системи виступають ключовим інструментом інтеграції просторово-часових даних, забезпечуючи підвищення ефективності аналітичних процесів та обґрунтованість управлінських рішень.

Аналіз сучасних наукових публікацій і прикладних розробок свідчить про активне впровадження геоінформаційних рішень у задачах національної безпеки, інтелектуального аналізу даних, гуманітарного розмінування та підтримки оперативного управління. Зокрема, у роботах С. Андрєєва, С. Ремезка, Д. Герчука, С. Горелика, М. Левченка, О. Трофимчука, П. Бідюка, В. Висоцької, О. Чередниченко, В. Литвина та інших дослідників розглядаються різні аспекти застосування геоінформаційних технологій у системах підтримки прийняття рішень. Особливістю цих досліджень є їх мультидисциплінарний характер, що забезпечує можливість адаптації методів і моделей до різних предметних областей, включаючи середовища з підвищеним рівнем ризику та невизначеності.

Водночас сучасний етап розвитку геоінформаційних технологій характеризується переходом від традиційних картографічних рішень до інтегрованих інформаційно-аналітичних систем, що базуються на використанні методів машинного навчання, аналізу великих даних та геоінформаційного моделювання. Це дозволяє формувати геоінформаційні бази даних як основу для побудови систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на забезпечення ситуаційної обізнаності.

Окрему увагу в дослідженнях приділено застосуванню геоінформаційних технологій у задачах оптимізації просторових процесів. Зокрема, використання методів машинного навчання, таких як дерева рішень (CART), у поєднанні з геоінформаційними моделями дозволяє здійснювати аналіз факторів середовища та прогнозування їх впливу на стан території. Поєднання таких підходів із алгоритмами оптимізації маршрутів, зокрема *least-cost path*, формує ефективний інструментарій для підтримки прийняття рішень у складних природно-територіальних умовах.

Таким чином, проведений аналіз свідчить про високий рівень розвитку геоінформаційних технологій та їх значний потенціал у вирішенні прикладних задач. Водночас актуальним залишається питання формування структурованих геоінформаційних баз даних як ядра систем підтримки прийняття рішень, здатних забезпечити інтеграцію різнорідних даних, підвищення рівня ситуаційної обізнаності та ефективність управління в умовах динамічних і ризикованих середовищ.

Метою роботи є обґрунтування та формування вхідних вимог до консолідованої інформації у геоінформаційній базі даних систем підтримки прийняття рішень, орієнтованих на забезпечення ситуаційної обізнаності.

Об'єктом дослідження є процеси створення та функціонування багатофункціональних систем ситуаційної обізнаності на основі геоінформаційних технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Ефективність проведення пошуково-рятувальних операцій на місцевості та, як наслідок, забезпечення збереження життя і здоров'я людей визначається сукупністю взаємопов'язаних факторів, що формують складну багатокомпонентну систему прийняття рішень. Ключову роль у цьому процесі відіграє рівень апріорної поінформованості всіх залучених суб'єктів, включаючи як безпосередніх учасників операцій, так і потенційних користувачів середовища, зокрема у сфері спортивного та екстремального туризму. Водночас вагомими чинниками є наявність і технічний стан засобів проведення операцій, рівень поточної ситуаційної обізнаності, що формується на основі геоінформаційних систем і систем підтримки прийняття рішень, а також професійна підготовка і компетентність залучених сил.

Не менш важливим є стан інфраструктури забезпечення безпеки, який включає як стаціонарні об'єкти спостереження і контролю, зокрема метеорологічні пости та системи моніторингу, так і транспортні, комунікаційні та медичні мережі. Сукупність зазначених факторів доповнюється впливом змінних і постійних умов, серед яких особливе значення мають нормативно-правове забезпечення, організаційні особливості функціонування рятувальних служб та локальні практики реагування на надзвичайні ситуації.

З позицій сучасних інформаційних технологій зазначені компоненти можуть бути інтегровані в єдине інформаційне середовище у вигляді геоінформаційної бази даних, що забезпечує консолідацію різномірної інформації, її просторово-часову прив'язку та подальший аналітичний супровід. Саме така інтеграція дозволяє формувати актуальну ситуаційну обізнаність та підвищувати обґрунтованість управлінських рішень у динамічних умовах.

Узагальнення впливу зазначених факторів доцільно розглядати в рамках концепції сферичності, запропонованої О. Шаблієм, відповідно до якої ефективність функціонування систем безпеки визначається взаємодією когнітивної, інформаційної та фізичної сфер. У такому підході процес забезпечення пошуково-рятувальних операцій розглядається як результат інтеграції знань, інформаційних потоків та характеристик середовища функціонування, що у генералізованому вигляді відображається у відповідній концептуальній моделі (рис. 1). В онтологічному представленні залежність ефективності взаємодії сторін надзвичайної події доцільно формалізувати у вигляді функціональної моделі:

$$W_ПРО^{\wedge} = CD \bigwedge_{ID} \bigwedge_{PD}, \quad (1)$$

де $W_ПРО^{\wedge}$ – ефективність (без узалежнення (на цьому етапі) від критеріїв ПРО або в ширшому розумінні системи забезпечення безпеки людей;

CD (від англ. Cognitive Domain) – когнітивна сфера (домен), під якою розуміється сукупність індивідуальних і колективних когнітивно-вольових якостей учасників НП або, в ширшому значенні, потенційних (ймовірних) учасників НП;

ID (від англ. Information Domain) – інформаційна сфера, інфосфера, сукупність сталої і змінної інформації та даних, а також їх відсутності та/або якості;

PD (від англ. Physical Domain) – повнота фізичної сфери, в яку входять соціосфера (людські та організаційні системи, як-от нормативно-правове забезпечення, традиції та система збирання та використання персональних даних тощо), техносфера (інфраструктурні речі), природна сфера (вияви природи згідно з порою року чи метеорологічними проявами, геофізичні та інші характеристики землі), географічна сфера (співвідношення між сторонами НП у часі та просторі).

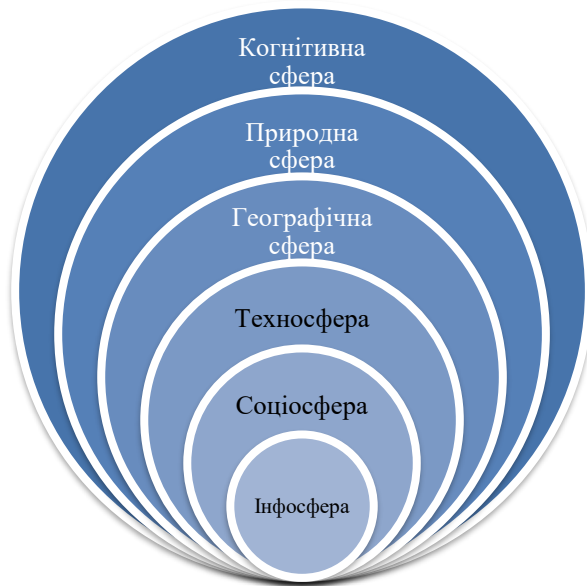


Рис. 1. Концептуальна модель залежності ефективності взаємодії сторін надзвичайної події від динаміки впливу внутрішніх та зовнішніх сфер у системі ситуаційної обізнаності

Більш детальне опрацювання методології використання онтологічних підходів у моделюванні взаємодії когнітивної, інформаційної та фізичної сфер потребує окремих досліджень і узагальнень. У межах даної роботи основну увагу зосереджено на одній із ключових складових цієї взаємодії, а саме на процесах збору, структурування та інтеграції різномірних даних для формування консолідованої інформації, необхідної для підтримки прийняття рішень у реальних і потенційних пошуково-рятувальних операціях.

Формування геоінформаційної бази даних систем підтримки прийняття рішень передбачає дотримання низки принципових вимог, серед яких визначальними є структурованість, ієрархічно-мережева організація, цілісність, захищеність та можливість інтеграції різномірних джерел даних. З урахуванням концепції взаємодії сфер доцільним є поділ геоінформаційної

бази даних на функціональні підсистеми, що відображають різні аспекти формування ситуаційної обізнаності, зокрема узагальнення досвіду, базові сталі та варіативні передумови, розвиток систем підтримки прийняття рішень, а також прогнозування і запобігання надзвичайним подіям.

У межах підсистеми узагальнення досвіду (Lesson Identified) особливе значення має формування структурованого масиву емпіричних даних, отриманих на основі аналізу надзвичайних подій і пошуково-рятувальних операцій. Такий масив включає детальний опис послідовності подій і дій із прив'язкою до конкретних просторово-часових умов, статистичні характеристики наслідків подій, зокрема рівень травматизму, випадки зникнення або загибелі, а також зв'язок цих показників із соціодемографічними та середовищними параметрами. Важливим компонентом є класифікація подій за видами діяльності, зокрема у сфері спортивного та екстремального туризму, а також урахування метеорологічних умов, таких як інтенсивність опадів, сила вітру, видимість, стан поверхні та інші фактори, що можуть бути отримані з даних дистанційного зондування Землі або наземних спостережень.

Крім того, до складу вхідних даних включаються відомості про способи отримання сигналів про надзвичайні події, рівень організованості груп, забезпеченість екіпуванням, а також характеристики середовища перебування, зокрема тип місцевості, морфологію рельєфу, складність маршруту та його відповідність офіційно визначеним трасам. Додатково враховуються соціально-фізіологічні характеристики постраждалих, клінічні прояви отриманих ушкоджень і рівень відповідності екіпування умовам перебування.

Інтеграція зазначених даних у геоінформаційній базі забезпечує можливість їх просторово-часової прив'язки, аналітичної обробки та подальшого використання в алгоритмах підтримки прийняття рішень. Це створює передумови для формування інформаційного середовища, здатного забезпечити високий рівень ситуаційної обізнаності, прогнозування ризиків та підвищення ефективності реагування на надзвичайні події у складних природно-техногенних умовах.

У межах підсистеми базових сталих передумов формування геоінформаційної бази даних ключове значення мають характеристики природного середовища та інфраструктурного забезпечення території. До них належать геоморфологічні особливості місцевості, зокрема типи ландшафтів, структура річкової мережі, а також загальна «матриця» підстильної поверхні, що визначає прохідність території. Визначення зазначених параметрів здійснюється із використанням цифрових моделей рельєфу (DEM), сформованих на основі супутникових даних та їх обробки у середовищах ArcGIS і QGIS. Важливу роль відіграє залучення даних супутникових місій Sentinel-2, які забезпечують багатоспектральний аналіз поверхні Землі та дозволяють розраховувати індекси стану рослинності (NDVI) і водних об'єктів (NDWI), що є критично важливими для оцінювання умов прохідності території та екологічних ризиків.

Особливе значення в умовах обмеженої видимості, складних погодних умов або воєнних дій має використання радіолокаційних даних, отриманих із супутників Sentinel-1, що працюють на основі технології SAR (Synthetic Aperture Radar). На відміну від оптичних сенсорів, SAR дозволяє здійснювати моніторинг поверхні незалежно від хмарності, часу доби та наявності диму чи

пилу, що є критично важливим для забезпечення безперервності спостережень. Дані SAR використовуються для виявлення змін у рельєфі, підтоплень, зсувних процесів, пошкоджень інфраструктури, а також для оцінювання прохідності територій у реальному часі.

Підсистема базових варіативних передумов відображає динамічні характеристики середовища функціонування пошуково-рятувальних операцій, які змінюються залежно від конкретних умов. У геоінформаційних системах ці параметри реалізуються у вигляді динамічних тематичних шарів, що формуються на основі оперативних супутникових даних, зокрема Sentinel-1 та Sentinel-2, оброблених у хмарних середовищах, таких як Google Earth Engine. Це дозволяє оперативно оновлювати інформацію про стан території, виявляти небезпечні зони та підтримувати прийняття рішень в умовах швидкоплинної обстановки.

Розвиток систем підтримки прийняття рішень у забезпеченні життя та здоров'я людей передбачає інтеграцію різномірних джерел даних у єдину геоінформаційну інфраструктуру. Використання середовищ ArcGIS забезпечує можливість проведення складного просторового аналізу, зокрема моделювання маршрутів евакуації із застосуванням алгоритмів least-cost path, а також інтеграцію супутникових даних, польових спостережень і сенсорної інформації. У цьому контексті поєднання оптичних і радіолокаційних даних дозволяє підвищити достовірність аналізу та зменшити вплив обмежень окремих джерел інформації.

Підсистема передбачення та запобігання надзвичайним подіям базується на використанні прогностичних моделей і геоінформаційного аналізу. Застосування даних Sentinel-2 дозволяє оцінювати зміни рослинного покриву та інші екологічні показники, тоді як дані Sentinel-1 використовуються для моніторингу динамічних процесів у складних умовах. Реалізація сценарного моделювання у середовищах Google Earth Engine та ArcGIS забезпечує можливість прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій і формування обґрунтованих управлінських рішень на основі інтегрованих просторово-часових даних [13].

Висновки

У результаті дослідження обґрунтовано доцільність розвитку систем підтримки прийняття рішень у безпекових прикладних задачах на основі інтеграції геоінформаційних технологій, даних дистанційного зондування Землі та інтелектуальних методів обробки інформації. Показано, що використання синергетичного підходу, який поєднує когнітивні, інформаційні та фізичні компоненти, дозволяє формувати ефективні моделі ситуаційної обізнаності та підвищувати обґрунтованість управлінських рішень у складних і слабо контрольованих середовищах, зокрема в умовах воєнних дій.

Запропоновано науково-методичний підхід до формування вхідних вимог до консолідованої інформації у геоінформаційній базі даних систем підтримки прийняття рішень, який передбачає структуризацію даних за функціональними підсистемами та інтеграцію різномірних джерел інформації. Доведено, що використання супутникових даних, зокрема платформ Sentinel-1 і Sentinel-2, у поєднанні з інструментами геоінформаційного аналізу, такими як ArcGIS та Google Earth Engine, забезпечує підвищення оперативності, повноти та достовірності інформаційного забезпечення.

Отримані результати створюють основу для подальшого розвитку інформаційних технологій ситуаційної обізнаності, орієнтованих на прогнозування ризиків, моделювання сценаріїв надзвичайних ситуацій та підвищення ефективності пошуково-рятувальних операцій у складних природно-техногенних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Тимчук, В. Ю., & Бортнік, Л. Л. (2013). Геоінформаційні системи та інформаційні технології у військовій справі (за матеріалами науково-практичного семінару з циклу "Січніві ГІСи". *Вісник геодезії та картографії*, 1, 27-32.
2. Trysnyuk, V., Smetanin, K., Humeniuk, I., Samchyshyn, O., & Trysnyuk, T. (2021). Information encryption method based on a combination of steganographic and cryptographic algorithm's features. In *Proceedings of the 2021 Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II-1 2021)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3187, pp. 150–159). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3187/paper14.pdf>
3. Cherednichenko, O., Lytvyn, V., Vysotska, V., Kowalska-Stychen, A., & Bodyanskiy, Y. (Eds.). (2025). *Proceedings of the Intelligent Systems Workshop at the 9th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (CoLInS-2025), Kharkiv, Ukraine, May 15–16, 2025* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3983). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3983/>
4. Shkarlet, S., Morozov, A., Palagin, A., Vinnikov, D., Stoianov, N., Zhelezniak, M., & Kazymyr, V. (Eds.). (2022). *Mathematical modeling and simulation of systems: Selected papers of the 17th International Conference MODS, November 14–16, 2022, Chernihiv, Ukraine*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0>
5. Trysnyuk, V., Lebid, O., Smetanin, K., Humeniuk, I., Samchyshyn, O., Shumeiko, V., & Trysnyuk, T. (2021). User authentication method for information and telecommunication systems based on cascading multimodal biometric identification. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2021)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3039, pp. 63–72). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3039/paper10.pdf>
6. Тимчук, В., Литвин, В., & Перегуда, О. (2023). Декомпозиція машини глибинного навчання на основі наборів спеціалізованих датасетів для зменшення часу обробки просторової інформації. *Військово-технічний збірник*, 28. 60-68. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.60-68>
7. Tomczyk, A. M., & Ewertowski, M. (2013). Planning of recreational trails in protected areas: Application of regression tree analysis and geographic information systems. *Applied Geography*, 40, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.02.004>
8. Sharma, S. (2021). Classification and regression trees: The use and significance of trees in analysis. *Journal on Recent Innovation in Cloud Computing, Virtualization & Web Applications*, 5(1).
9. Кравець, Т. (2020). Суспільно-географічна сутність військової сфери. *Географія та туризм*, 57, 50-57. <https://doi.org/10.17721/2308-135X-2020.57.50-57>
10. Faulhaber, M., Pocecco, E., Niedermeier, M., Ruedl, G., Walter, D., Sterr, R., Ebner, H., Schobersberger, W., & Burtcher, M. (2017). Fall-related accidents among hikers in the Austrian Alps: A 9-year retrospective study. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 3, e000304. <https://bmjopensem.bmj.com/content/3/1/e000304>
11. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Radchuk, I., Horoshkova, L., Khlobystov, Ie., & Nagorny, Yu. (2021). Modeling of dangerous processes of natural and man-made disasters. In *Geoinformatics Online Event (11–14 May 2021)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521063>

Стаття надійшла до редакції 09.02.2026, надійшла після рецензування 26.03.2026, прийнята 16.04.2026

REFERENCES

1. Tymchuk, V. Yu., & Bortnik, L. L. (2013). Geographical information systems and information technologies in military affairs (Based on materials of the scientific and practical seminar from the “January GIS” series). *Bulletin of Geodesy and Cartography*, (1), 27–32.
2. Trysnyuk, V., Smetanin, K., Humeniuk, I., Samchyshyn, O., & Trysnyuk, T. (2021). Information encryption method based on a combination of steganographic and cryptographic algorithm's features. In *Proceedings of the 2021 Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems II (CPITS-II-1 2021)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3187, pp. 150–159). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3187/paper14.pdf>
3. Cherednichenko, O., Lytvyn, V., Vysotska, V., Kowalska-Stychen, A., & Bodyanskiy, Y. (Eds.). (2025). *Proceedings of the Intelligent Systems Workshop at the 9th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems (CoLInS-2025), Kharkiv, Ukraine, May 15–16, 2025* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3983). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3983/>
4. Shkarlet, S., Morozov, A., Palagin, A., Vinnikov, D., Stoianov, N., Zhelezniak, M., & Kazymyr, V. (Eds.). (2022). *Mathematical modeling and simulation of systems: Selected papers of the 17th International Conference MODS, November 14–16, 2022, Chernihiv, Ukraine*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-30251-0>
5. Trysnyuk, V., Lebid, O., Smetanin, K., Humeniuk, I., Samchyshyn, O., Shumeiko, V., & Trysnyuk, T. (2021). User authentication method for information and telecommunication systems based on cascading multimodal biometric identification. In *Proceedings of the 1st International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems (ITTAP 2021)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3039, pp. 63–72). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3039/paper10.pdf>
6. Tymchuk, V., Lytvyn, V., & Pereguda, O. (2023). Decomposition of a deep learning machine based on sets of specialized datasets to reduce spatial information processing time. *Military Technical Collection*, 28, 60–68. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.28.2023.60-68>
7. Tomczyk, A. M., & Ewertowski, M. (2013). Planning of recreational trails in protected areas: Application of regression tree analysis and geographic information systems. *Applied Geography*, 40, 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.02.004>
8. Sharma, S. (2021). Classification and regression trees: The use and significance of trees in analysis. *Journal on Recent Innovation in Cloud Computing, Virtualization & Web Applications*, 5(1).
9. Kravets, T. (2020). The socio-geographical essence of the military sphere. *Geography and Tourism*, 57, 50–57. <https://doi.org/10.17721/2308-135X-2020.57.50-57>
10. Faulhaber, M., Pocecco, E., Niedermeier, M., Ruedl, G., Walter, D., Sterr, R., Ebner, H., Schobersberger, W., & Bartscher, M. (2017). Fall-related accidents among hikers in the Austrian Alps: A 9-year retrospective study. *BMJ Open Sport & Exercise Medicine*, 3, e000304. <https://bmjopensem.bmj.com/content/3/1/e000304>
11. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Radchuk, I., Horoshkova, L., Khlobystov, Ie., & Nagorny, Yu. (2021). Modeling of dangerous processes of natural and man-made disasters. In *Geoinformatics Online Event (11–14 May 2021)* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521063>

The article was received 09.02.2026, received after revision 26.03.2026, accepted 16.04.2026

Тимчук Володимир Юрійович

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник Наукового центру Сухопутних військ Національної академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного

Адреса робоча: Україна, м. Львів, вул. Героїв Майдану, 32

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3549-2813> **e-mail:** v_tymchuk@yahoo.co.uk

Триснюк Василь Миколайович

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

Худоба Володимир Володимирович

кандидат географічних наук, доцент, доцент кафедри туризму Львівського державного університету фізичної культури імені Івана Боберського

Адреса робоча: Україна, м. Львів, вул. Костюшка 11

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4472-951X> **e-mail:** khudoba.volodymyr@gmail.com

Делятинчук Андрій Іванович

голова Ясінянської об'єднаної територіальної громади

Адреса робоча: Україна, Закарпатська область, Рахівський район, селище Ясіня, вул. Борканюка, 7

e-mail: info@yasinya-gromada.gov.ua

UDC 528.88:550.34.01:623.45

Viacheslav Vyshniakov¹, PhD, Associate Professor of the Department of Geospatial Support and Application of Space Systems, National Defence University of Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-0505> **e-mail:** wishnya_dzz@ukr.net

Oleksandr Liashchuk², PhD, Senior Reasearcher, Deputy Head of the Main Center for Special Monitoring of the National Space Facilities Control and Test Center
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-1808> **e-mail:** alex_liashchuk@ukr.net

Viktor Mamarev³, PhD, Deputy Head of Analytical Department, National Space Facilities Control and Test Center
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2233-7432> **e-mail:** mamarev@spacecenter.gov.ua

Yurii Andrushchenko², PhD, Head of the Information Collection and Processing Center of the Main Center for Special Monitoring of the National Space Facilities Control and Test Center
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8993-0113> **e-mail:** andruschenko_yuriy@ukr.net

Oleksandr Koshlan¹, PhD, Senior Researcher, Associate Professor of the Department of Infrastructure and Transport Support, National Defence University of Ukraine
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9678-6463> **e-mail:** koshlan_sasha@ukr.net

¹National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Main Center for Special Monitoring of the National Space Facilities Control and Test Center, Ukraine

³National Space Facilities Control and Test Center, Kyiv, Ukraine

COMPREHENSIVE INFORMATION AND EARTH-SPACE MONITORING OF NATURAL PHENOMENA AND MAN-MANUFACTURED DISASTERS

Abstract. *The article examines approaches to ensuring situational awareness under current threats to national security through the integration of heterogeneous data sources. The aim of the study is to harmonize methods for using Earth remote sensing data, ground-based geophysical monitoring, and open-source information to detect and verify natural and technogenic events.*

The research methodology is based on a comprehensive analysis of multisensor information, including satellite imagery of various spatial resolutions, seismic and infrasound data, as well as mass media reports. Methods of spatio-temporal correlation, signal processing, and comparative analysis were applied.

The results confirm the effectiveness of the integrated approach for determining the parameters of technogenic events, including the time, location, and energy characteristics of explosions. Case studies of real events demonstrate the possibility of reliable verification even under conditions of limited availability of individual data sources.

The theoretical significance lies in the development of methodologies for spectral analysis of geophysical processes. The practical significance is associated with the application of the results to support decision-making in the field of security and defense.

The scientific novelty is defined by the integration of data sources of different physical nature into a unified event verification system.

The limitations of the study are related to the availability of very high-resolution satellite data and the technical characteristics of sensors. Future research prospects include the development of automated data processing algorithms and the expansion of monitoring networks.

Keywords: Earth remote sensing; emergencies; situational awareness; seismic signals; satellite imagery; integrated analysis.

В.Ю. Вишняков¹, О.І. Ляшук², В.М. Мамарев³, Ю.А. Андрущенко², О.В. Кошлань¹

¹Національний університет оборони України, м. Київ, Україна

²Головний центр спеціального контролю НЦУВКЗ, сел. Городок, Україна

³Національний центр управління та випробувань космічних засобів, м. Київ, Україна

КОМПЛЕКСНИЙ ІНФОРМАЦІЙНИЙ ТА НАЗЕМНО-КОСМІЧНИЙ МОНІТОРИНГ ПРИРОДНИХ ЯВИЩ ТА ТЕХНОГЕННИХ КАТАСТРОФ

Анотація. У статті досліджено підходи до забезпечення ситуаційної обізнаності в умовах сучасних загроз національній безпеці шляхом інтеграції різномірних джерел даних. Метою дослідження є узгодження методів використання даних дистанційного зондування Землі, наземного геофізичного моніторингу та відкритих інформаційних джерел для виявлення та верифікації природних і техногенних подій.

Методологія дослідження базується на комплексному аналізі мультисенсорної інформації, включаючи супутникові знімки різної просторової розрізненості, сейсмічні та інфразвукові дані, а також повідомлення засобів масової інформації. Використано методи просторово-часової кореляції, обробки сигналів і порівняльного аналізу.

Результати дослідження підтверджують ефективність інтегрованого підходу для визначення параметрів техногенних подій, зокрема часу, місця та енергетичних характеристик вибухів. На прикладах реальних подій доведено можливість достовірної верифікації навіть за умов обмеженості окремих джерел інформації.

Теоретичне значення полягає у розвитку методології спектрального аналізу геофізичних процесів. Практичне значення полягає у можливості застосування результатів для підтримки прийняття управлінських рішень у сфері безпеки та оборони.

Наукова новизна визначається інтеграцією різних за природою джерел інформації в єдину систему верифікації подій.

Обмеження дослідження пов'язані з доступністю супутникових даних надвисокої просторової розрізненості та технічними характеристиками сенсорів. Перспективи подальших досліджень полягають у розвитку автоматизованих алгоритмів обробки даних та розширенні мереж моніторингу.

Ключові слова: зондування Землі; надзвичайні ситуації; ситуаційна обізнаність; сейсмічні сигнали; інфразвук; супутникові знімки; комплексний аналіз.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.172-188>

Вступ

В умовах сучасних викликів національній безпеці та обороні України, зокрема збройної агресії російської федерації, масштабного техногенного екоциду та змушеного проведення превентивних заходів безпеки на території агресора критичного значення набуває здатність держави здійснювати безперервний та всепогодний контроль безпекового простору.

Інтенсивний розвиток засобів і мереж передачі та обробки даних створив передумови для розвитку різноманітних підходів до комплексування інформації від вимірювальних систем, що побудовані на різних фізичних принципах. Одночасне вимірювання «фізичних полів» різної природи дозволяє забезпечити принципово нову «якість» інформації про об'єкти, події та явища. Станом на сьогодні в Україні функціонує Національний центр управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ), який здатен отримувати дані інформації з використанням наземних методів геофізичного моніторингу, дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та здійснювати аналіз з відкритих джерел та засобів масової інформації (ЗМІ). Комплексне використання цих методів дозволить отримати об'єктивну картину, що не залежить від маніпуляцій у медіапросторі: від моменту вибуху до детальної фіксації руйнувань на об'єктах, як на нашій території, так і в глибокому тилу противника.

Постановка проблеми

Гібридна війна та активне використання засобів масової інформації для введення в оману вимагають нових підходів для отримання достовірної інформації як органами державної влади, так і керівництвом сил безпеки та оборони для забезпечення прийняття вірних управлінських рішень. Активне застосування Україною повітряного та ракетного озброєння для нанесення ударів по інфраструктурі РФ для послаблення логістичного забезпечення агресії проти України вимагають створення принципово нових систем ситуаційної обізнаності.

У цьому контексті актуальність комплексного інформаційного та наземно-космічного моніторингу трансформується у задачу верифікації руйнувань критичних об'єктів, складів боєприпасів та логістичних вузлів агресора. Використання лише одного джерела даних (зі ЗМІ чи супутникових знімків) може бути хибним або недостатнім через хмарність і можливість маскування наслідків. Натомість, інтеграція даних ЗМІ, сейсмічних, акустичних методів та даних ДЗЗ дозволяє створити систему, в якій поєднуються різні джерела інформації та здійснюється достовірний, об'єктивний аналіз ситуації. При цьому система комплексного моніторингу має використовувати ЗМІ як оперативний індикатор, а геофізичні методи та ДЗЗ як інструменти об'єктивного підтвердження та верифікації.

Таким чином, розробка методології комплексного інформаційного та наземно-космічного моніторингу є пріоритетним напрямом для забезпечення інформаційної переваги та прийняття своєчасних рішень у сфері безпеки та оборони України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Впродовж останніх десятиліть розвиток геофізичного моніторингу та ДЗЗ перейшов від етапу фундаментальних спостережень до формування систем глобальної ситуаційної обізнаності. Сучасна науково-методична база дозволяє не лише накопичувати значні обсяги даних, а й здійснювати їх автоматизовану інтерпретацію в інтересах національної безпеки та оборони.

Аналіз фахових публікацій [1–10] свідчить про зміщення акцентів у бік прикладного використання мультисенсорних мереж. Дослідники все частіше розглядають антропогенні та природні явища не як ізольовані події, а як складні геофізичні процеси, що потребують комплексного аналізу.

Водночас, повномасштабна збройна агресія проти України виявила потребу у критичному переосмисленні існуючих підходів. Виникає необхідність адаптації цивільних методик моніторингу для вирішення специфічних військових завдань, які традиційними методами розвідки не можуть бути визначені.

Метою дослідження є узгодження підходів до комплексного застосування методів ДЗЗ, наземного геофізичного моніторингу та аналізу даних з відкритих інформаційних джерел. Впевнитися в ефективності виявлення та оцінювання наслідків природних і техногенних явищ, подій та катастроф в системі ситуаційної обізнаності.

Результати дослідження

На сьогодні в Україні здійснюється ДЗЗ та контактне зондування Землі (КЗЗ), що дає можливість проводити випереджальну верифікацію повідомлень з відкритих інформаційних джерел на основі об'єктивних даних. Основними функціями зазначених систем моніторингу є накопичення, оброблення, інтерпретування та розповсюдження даних, а також результатів їх оброблення.

Для задач космічного моніторингу надзвичайних подій природного та техногенного походження використовуються як пасивні (оптичні), так і активні (радіолокаційні) системи. Сучасні засоби ДЗЗ надають можливість отримання інформації з просторовою розрізненістю від десятків кілометрів до десятків сантиметрів. Суттєвими перешкодами для отримання цих даних є непередбачена хмарність (для оптичних систем) і технічні особливості супутників, на яких розташовані системи ДЗЗ, а саме висота орбіти, періодичність прольоту над певною територією.

Прийом та оброблення даних ДЗЗ здійснюється на наземних приймальних станціях в X, L та S діапазонах, станціях нормалізації, тематичного оброблення та збереження даних в більшості в денний час. В залежності від просторової розрізненості та спектральних властивостей каналів отриманих даних ДЗЗ фахівцями визначаються:

- за даними низької та середньої просторової розрізненості: температурні аномалії (ймовірні надзвичайні ситуації (НС)), ділянки з аномальними геофізичними показниками підстильної поверхні (температура земної та водної поверхні, різноманітні індекси, димові шлейфи);
- за даними високої та надвисокої просторової розрізненості: часові зміни на урбанізованих та природних ділянках, визначення об'єктів і джерел надзвичайних ситуацій, фіксація умов, що призвели до виникнення НС [7–9, 11].

На відміну від ДЗЗ, КЗЗ дозволяє здійснювати моніторинг безперервно і не залежить від зовнішніх чинників. Наземна складова традиційно використовує комплекс пасивних геофізичних методів, що дозволяють проводити виміри аномалій геофізичних полів від літосфери/гідросфери до атмосфери, іоносфери та магнітосфери.

Для здійснення задачі геофізичного моніторингу за природними та штучними геофізичними полями та явищами, а також для спостереження забруднення довкілля радіоактивними речовинами використовується територіально рознесена мережа сенсорів (пасивні сейсмічні, інфразвукові, геомагнітні, радіонуклідні, радіотехнічні), об'єднаних каналами зв'язку та єдиним центром даних в режимі 24/7.

Так, наприклад, будь-який вибух (техногенний чи природний) створює пружні хвилі, які поширюються в земній корі та атмосфері і можуть бути зафіксовані відповідними сенсорами.

Перевагами методів геофізичного моніторингу можна вважати оперативність, незалежність від погодних умов, добового чи сезонного періоду. В той же час, зазначені методи не дають можливості проведення комплексного моніторингу, що охоплює різні характеристики досліджуваних об'єктів, відображення динаміки протікання процесів, картографування потенційно небезпечних ділянок, визначення наслідків надзвичайної ситуації (ступені ушкодження об'єктів, площі пошкодження).

У подальшому, в разі необхідності, до аналізу можуть залучатися дані метеорологічного та радіонуклідного моніторингу, дані ДЗЗ з архівів комерційних супутників, застосування безпілотних літальних апаратів та плануватися заходи з подальшого моніторингу. Використання вказаних методів у комплексі дозволяє здійснювати безперервний моніторинг території України та інших держав на предмет визначення НС (рис. 1).

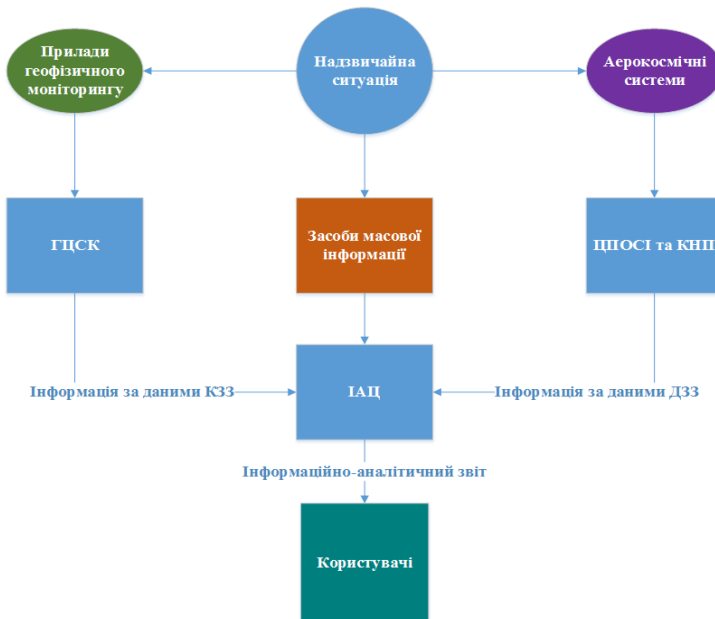


Рис. 1. Схема комплексного інформаційного та наземно-космічного моніторингу природних і техногенних явищ та катастроф

Інформація про НС фіксується трьома шляхами: з застосуванням аерокосмічних систем, приладів геофізичного моніторингу та засобів масової інформації. Отримані дані потрапляють в Інформаційно-аналітичний центр, де аналізуються та трансформуються в інформаційно-аналітичний звіт, який надається користувачу для прийняття управлінських рішень.

З метою оцінки ефективності виявлення та оцінювання наслідків природних і техногенних явищ, подій та катастроф в системі ситуаційної обізнаності авторами були опрацьовані та проаналізовані виявлені вибухи, що сталися на території держави та у глибокому тилу агресора під час повномасштабного вторгнення.

Підри्व греблі Каховської ГЕС 5 червня 2023 року

Аналіз даних ДЗЗ дозволив виявити аномальну роботу дамби, яка почалася з листопада 2022 року. З 15 листопада 2022 року і до моменту підриву ГЕС скидання води здійснювалось з одного і того ж елемента греблі, що підтверджується космічними знімками компанії Planet Lab, отриманими у період з 2022-11-15 по 2023-06-03 (рис. 2). Однак ймовірність руйнування конструкції оцінювалася як низька, за умови належного обслуговування дамби. Також висувалася гіпотеза можливого впливу попередніх пошкоджень та підвищення рівня води.

Масштаби та характер руйнування були зафіксовані за допомогою супутникових оптичних знімків SkySat, опублікованих Planet Lab, що надає додаткові цінні докази стану дамби [12] (рис. 3).



Рис. 2. Ймовірні ознаки пошкодження запірних шандорів Каховської ГЕС

Аналіз даних ЗМІ показав, що перші повідомлення з'явилися у ЗМІ вже через десяток хвилин після прориву дамби. Хвиля повідомлень зростала по мірі накопичення інформації. Норвезький інститут NORSAR повідомив про виявлення сейсмічних сигналів, ймовірно, від сильного вибуху, зазначивши, що час і місце відповідають інформації ЗМІ.

За результатами аналізу сейсмоакустичних даних було визначено, що вибух стався 5 червня 2023 року 23:34:50 UTC. Обробка сейсмічних сигналів проводилася у програмному пакеті Seiscomp5 з використанням стандартної швидкісної моделі IASPI91 та локатора LOCSAT. Зазначимо, що визначення



Рис. 3. Руїнування Каховської греблі 05.06.2023, джерело – SkySat

точного часу події супроводжувалося певними складнощами. По-перше, малою потужністю вибуху і, як наслідок, малою кількістю сейсмічних станцій, які його зареєстрували. Сигнал було зареєстровано сейсмічними масивами PS45 (Україна) та BURARI (Румунія) і сейсмічними станціями SORM (Молдова) та LUBAR (Україна). По-друге, змішуванням сигналів від різних подій на одному часовому проміжку. Так, на сейсмічній станції PS45 сигнал від вибуху наклався на сигнал від іншої події (Тонга, 23:16:02, -19.4 -175.52, $M=4.3$). Однак застосування фільтрації в різних частотних смугах дало можливість розділити високочастотний локальний та низькочастотний телесеїсмічний сигнали. Сейсмічна обстановка в Україні була також ускладнена іншими вибухами в результаті ракетно-бомбових ударів агресора, втім сейсмічні сигнали від цих подій мали інші локації та час.

Однозначним підтвердженням вибухової природи події стали сигнали, зареєстровані мережею українських інфразвукових масивів. Залучалися інфразвукові групи мікробарографів KPDA (Кам'янець-Подільський), МААГ (Малин) та GRDI (Городок). Суть роботи таких масивів полягає у виявленні когерентної складової на фоні некогерентного шуму, що дозволяє виявляти сигнали навіть на рівні фону. Обробка даних інфразвукових масивів дає можливість визначати азимут на подію, а при подальшому використанні мережі станцій і локалізувати її. Аналіз даних проводився в програмному пакеті WinPMCC (рис. 3–5) з використанням алгоритму прогресивної мультіканальної кореляції (*Progressive Multi Channel Correlation* (PMCC)) [13]. Після визначення часу події сейсмічними засобами, спрогнозовано час

прибуття інфразвукових сигналів на кожен елемент інфразвукового масиву. Прогноз фаз збігся із часом їх реального вступу для швидкості сигналу 290-300 м/с. Мапа з результатами розрахунків наведена на рис. 4.

Ідентифікація події та визначення її потужності проводилася за методикою, апробованою на інших вибухових подіях на території України [14].

Оцінка енергії в тротиловому еквіваленті для сейсмічних даних проводиться на основі енергетичного класу K . При визначенні енергетичного класу події використовувалася максимальна амплітуда в P - і $S(Lg)$ - фазах сейсмічних хвиль на короткоперіодних каналах. Далі розрахунок проводився за формулою (1):

$$K = 1,8 \lg(A_p + A_s) + \sigma(\Delta), \quad (1)$$

де: A_p і A_s – максимальна амплітуда P і S – хвиль в мікронах; $\sigma(\Delta)$ – калібрувальна функція для $(A_p + A_s)$ в діапазоні відстаней від 10 до 3000 км.

Для оцінки залежності між енергетичним класом і оцінками потужності вибухів в тротиловому еквіваленті використовувалися статистичні дані про вибухи у північних та центральних областях України [15].

Отримана залежність між енергетичним класом K і потужністю вибухів Y має вигляд:

$$K = 1,5511 \lg(Y) + 1,2653, \quad (2)$$

що еквівалентно наступному:

$$Y = 10^{(K-1,2653)/1,5511}. \quad (3)$$

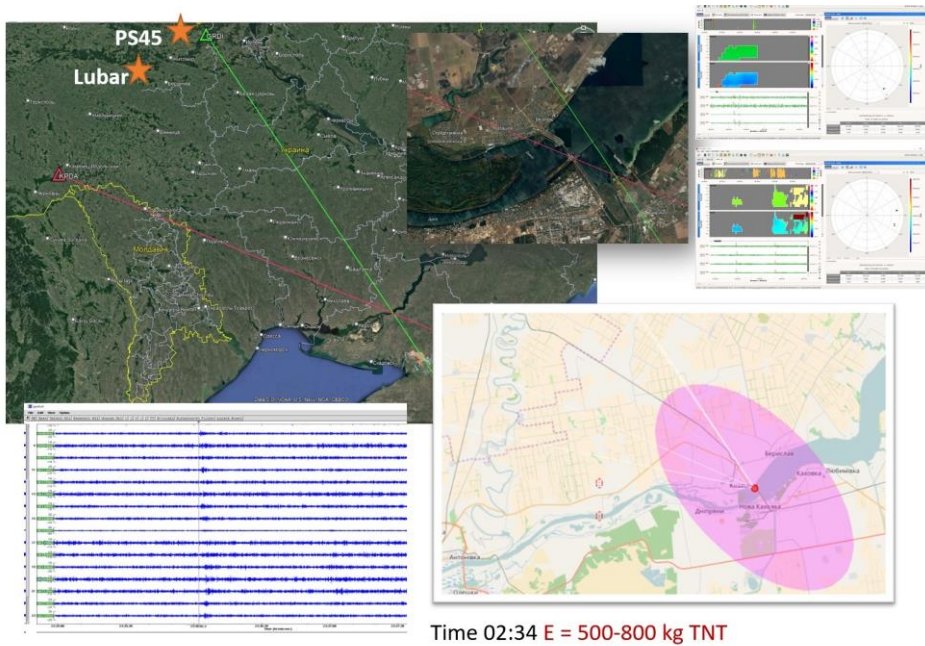


Рис. 4. Карта (згори) і результат розрахунків за інфразвуковими даними, сейсмічні дані та мапа з результатами виявлення

Для конкретної події енергетичний клас склав $K=5,74$ (магнітуди $M=1$, $mb=1.99$), що відповідає потужності 767 кг ТНТ.

Оцінка енергетичних параметрів за акустичними даними здійснювалася за допомогою емпіричної формули, запропонованої AFTAC (Air Force Technical Applications Center) [16]:

$$Y_{(TNT)} = 2 * \left(\frac{T}{5.92} \right)^{3.34}, \quad (4)$$

де Y – потужність в кілотоннах ТНТ, T – період інфразвукового сигналу, виміряний на ділянці максимальної амплітуди.

Переважаючі періоди склали для інфразвукової станції МААГ $T = 0,55$ с, для станції КРДА $T = 0,59$ с, та $T = 0,6$ с для GRDI, що відповідно має енергію 714 кг ТНТ, 903 кг ТНТ та 956 кг ТНТ.

В цілому, розраховані значення енергії з використанням сейсмічних та акустичних даних корелюють між собою, тож наданий усереднений результат для органів реагування склав близько 800 кг ТНТ.

Таким чином, комплексне застосування методів ДЗЗ, наземного геофізичного моніторингу та аналізу даних з відкритих інформаційних джерел дозволив констатувати факт підриву греблі Каховської ГЕС 5 червня 2023 року о 23:34:50 UTC.

Вибухи на 107-му арсеналі ГРАУ мін. оборони рф, 18 вересня 2024 року

За даними ЗМІ рф у ніч проти 18 вересня відбулася масована атака безпілотників у місті Торопець Тверської області. Оголошено про евакуацію населення з території, де працювала ППО і спалахнула пожежа. В мережі з'явилися відео потужних вибухів та масштабних пожеж від місцевих жителів, які повідомили, що був атакований склад із боєприпасами.

Пізніше ряд українських ЗМІ із посиланням на СБУ повідомили, що склад головного ракетно-артилерійського управління мін. оборони рф у Торопці атакували дрони СБУ, ГУР та ССО. На цьому складі зберігались ракети для комплексів «Іскандер» і «Точка-У», а також керовані авіаційні бомби (КАБи).

Сейсмічним та акустичним методами виявлення у період з 03:56 до 18:00 18 вересня 2024 року було зареєстровано серію з 22 сигналів техногенного походження. Перелік сейсмічних джерел з території м. Торопець, Тверської області, рф, зареєстрованих технічними засобами Головного центру спеціального контролю (ГЦСК) 18 вересня 2024 року, представлено в таблиці 1. За результатами поглибленого аналізу геофізичної інформації з пунктів спостереження встановлено, що джерела сигналів знаходяться у районі м. Торопець, Тверської області, рф: розрахункові координати місця події: 56,50 пн.ш., 31,70 сх.д. (рис. 5).

При обробці даних сейсмічного і акустичного методу виявлення були використані сигнали, зареєстровані пунктами спостереження «Балта» та «Малин», малоапертурними акустичними групами МААГ1, КРДА та сейсмічною станцією PS45. Крім того, окремі акустичні сигнали від найбільш потужних вибухів були зареєстровані інфразвуковими станціями IS26 (Німеччина) та IS43 (Російська Федерація) Міжнародної системи моніторингу Організації договору про всеосяжну заборону ядерних вибухів (ОДВЗЯВ).

Діапазон розрахункових потужностей склав 20-155 тонн ТНТ. Значення потужності, визначені з використанням сейсмічних та акустичних даних, показали високу кореляцію, що свідчить про ефективність застосованих методик розрахунків.

Аналіз результатів даних ДЗЗ підтвердив факт виникнення та масштаби надзвичайної події на території військового арсеналу. На першому етапі за допомогою сервісів оперативного моніторингу, зокрема системи FIRMS (Fire Information for Resource Management System), було зафіксовано численні теплові аномалії. Використання стандартних продуктів низької просторової розрізненості MODIS Land (MOD14/MYD14) дозволило оперативно ідентифікувати осередки горіння в тепловому інфрачервоному діапазоні (рис. 6), що безпосередньо свідчить про інтенсивну пожежу, спричинену серією вибухів на об'єкті.

Для проведення детальної оцінки пошкоджень та оцінки ступеня руйнувань було залучено космічні знімки високої просторової розрізненості.

Порівняльний аналіз мультиспектральних зображень дозволив верифікувати наслідки прямих влучань та вторинної детонації боєприпасів.

Таблиця 1

№ з/р	Час в джерелі (Київський)	Магнітуда	Розрахована потужність (Тонн ТНТ)
1.	03:56:27	2.8	110
2.	04:23:27	2.9	155
3.	04:29:24	2.8	100
4.	04:38:55	2.4	40
5.	04:41:43	2.4	35
6.	04:43:55	2.5	54
7.	05:04:04	2.4	36
8.	05:28:58	2.4	42
9.	05:32:27	2.6	57
10.	05:37:02	2.3	32
11.	05:39:24	2.4	36
12.	05:43:04	2.2	23
13.	05:46:12	2.4	40
14.	05:56:33	2.2	23
15.	06:00:50	2.4	36
16.	06:06:57	2.3	26
17.	06:23:30	2.7	88
18.	06:43:11	2.4	35
19.	06:54:21	2.3	27
20.	08:38:46	-	63
21.	09:03:07	-	102
22.	17:56:46	2.9	118

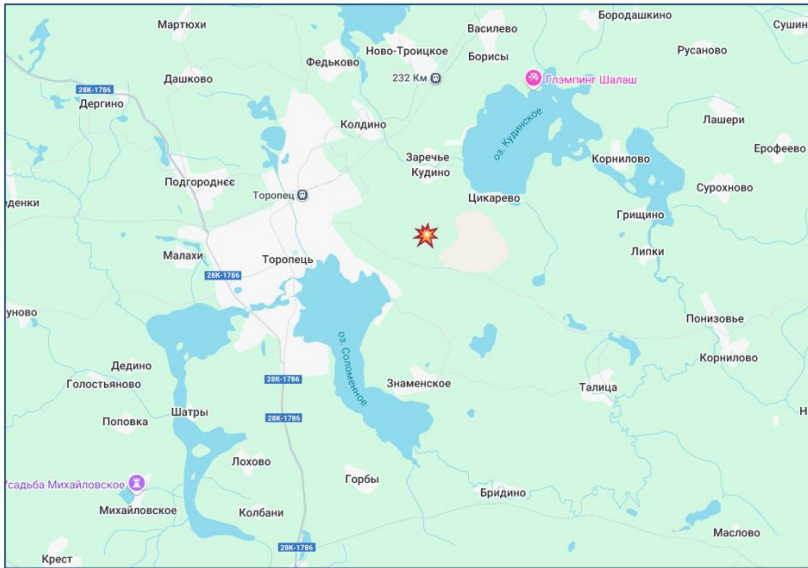


Рис. 5. Розташування джерела сейсмічних сигналів з території м. Торопець, Тверської області, рф, зареєстрованих технічними засобами ГЦСК 18.09.2024 року



Рис. 6. Система інформації про пожежі для управління ресурсами (FIRMS) NASA

На рис. 7 візуалізовано результати дешифрування: зірочками ідентифіковано місця повного або часткового руйнування споруд та критично важливих сховищ. Окреслена зона максимальних ушкоджень надала можливість встановити точну площу ураження та оцінити рівень втрат інфраструктури об'єкта. Поєднання даних різної просторової розрізненості підтвердило свою ефективність для верифікації масштабних техногенних подій та їх подальшої експертної оцінки.

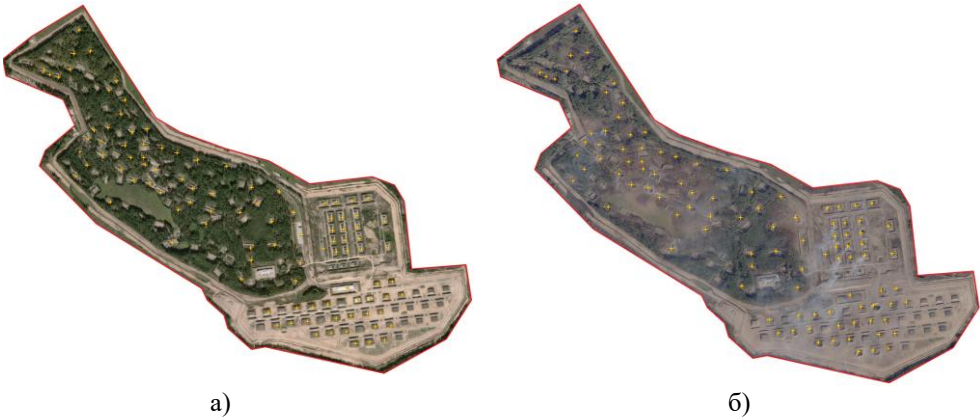


Рис. 7. Оцінка результатів вогневого ураження 107-го арсеналу Головного управління ракетно-артилерійського управління за бітемпоральними оптичними знімками: а) 09.09.2024 (до ураження), б) 21.09.2024 (після ураження)

**Вибухи на аеродромі "Енгельс" у Саратовській області рф
20 березня 2025 року**

20 березня 2025 року сейсмічним та акустичним методами виявлення було зареєстровано сигнал техногенного походження з району м. Енгельс, Саратовської області, рф. Перелік сейсмічних джерел з території м. Енгельс, Саратовської області, рф, зареєстрованих технічними засобами ГЦСК 20 березня 2025 року, представлено в таблиці 2. Розрахункова потужність сигналу склала близько 40 тонн ТНТ.

При обробці даних акустичного методу виявлення були використані сигнали, зареєстровані пунктами спостереження «Балта» та «Малин». Крім того, окремі акустичні сигнали від найбільш потужних вибухів були зареєстровані інфразвуковими станціями IS26 (Німеччина) та IS43 (рф) Міжнародної системи моніторингу Організації договору про всеосяжну заборону ядерних вибухів (ОДВЗЯВ) (рис. 8).

У ЗМІ Генеральним штабом ЗСУ було повідомлено, що підрозділами СБУ, ССО ЗСУ, у взаємодії з іншими складовими Сил оборони, у ніч на 20 березня було завдано удару по аеродрому "Енгельс" у Саратовській області рф. Пізніше зроблене уточнення, що ворог втратив 96 крилатих ракет повітряного базування (зокрема, і внаслідок вторинної детонації). Надана інформація корелюється із даними, отриманими засобами геофізичного контролю.

Таблиця 2

№ з/п	Дата	Час в джерелі (київський)	Координати джерела		Розрахункова потужність вибуху, тонн ТНТ	Місце джерела
			широта	довгота		
1.	20.03.25	05:09:11	51,49 пн.ш.	46,19 сх.д.	близько 40	Саратовська область, рф

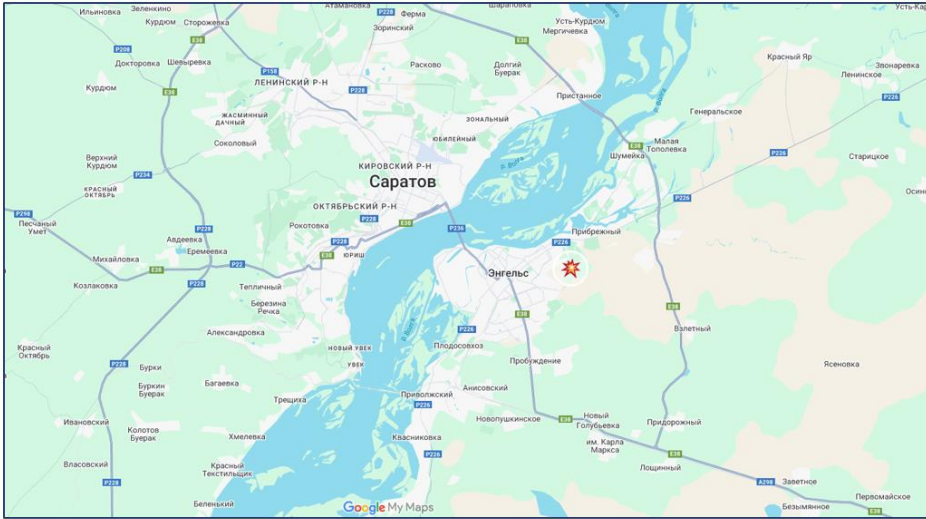


Рис. 8. Результат реєстрації інфразвукових сигналів від вибухів на військовому об'єкті, район м. Енгельс

Порівняльний аналіз космічних знімків високої розрізненості за 14.10.2024 та 21.03.2025 дозволив верифікувати значне вогневе ураження складу ракетно-авіаційного озброєння авіабази «Енгельс». Шляхом пооб'єктного дешифрування встановлено повну деструкцію щонайменше 11 спеціалізованих сховищ та ангарів, що позначені на знімку маркерами (рис. 9). Характер пошкоджень (обвал покрівель та руйнування стін) свідчить про прямі влучання та ймовірну вторинну детонацію боєприпасів всередині будівель.

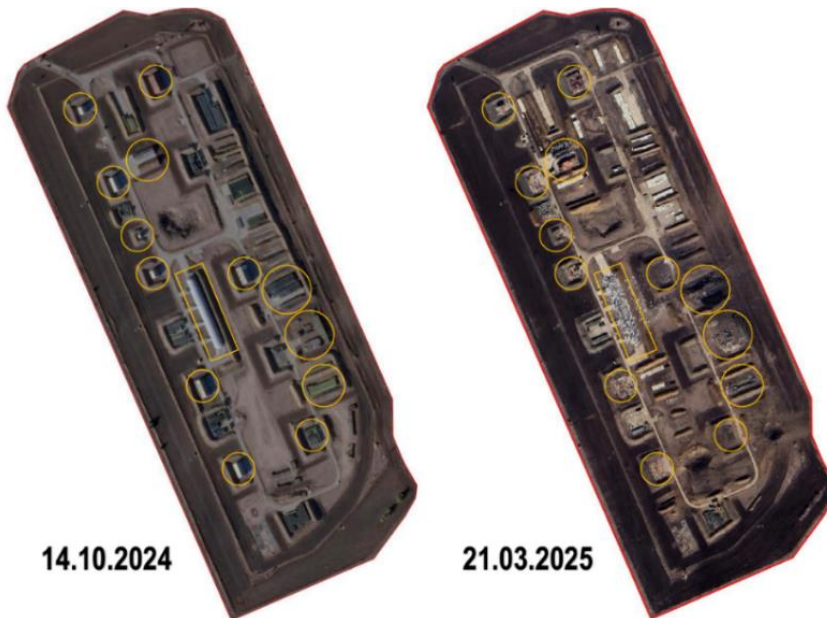


Рис. 9. Оцінка результатів вогневого ураження складу ракетно-авіаційного озброєння авіабази «Енгельс» за бітемпоральними оптичними знімками

Окремо зафіксовано тотальне знищення центральної споруди (виділено прямокутником), на місці якої спостерігається масштабне поле уламків будівельних конструкцій. Окрім механічних руйнувань, на території об'єкта виявлено численні термічні аномалії у вигляді зміненого кольору ґрунту, що є прямим наслідком інтенсивного горіння та розльоту вибухонебезпечних матеріалів. Сукупність виявлених деструктивних ознак у межах окресленого периметру свідчить про критичне ураження інфраструктури та фактичну втрату об'єктом можливостей для подальшого зберігання і обслуговування ракетно-авіаційного озброєння.

Висновки та перспективи подальших досліджень

За результатами проведених досліджень було визначено, що в умовах сучасної війни жоден метод моніторингу небезпечних природних явищ та техногенних подій (надзвичайних ситуацій) не є самодостатнім. Практично доведено ефективність використання комплексного наземно-космічного моніторингу з застосуванням як власних національних засобів (підрозділів НЦУВКЗ), так і залученням міжнародних мереж.

Інтеграція комплексного наземно-космічного моніторингу у загальну систему управління силами безпеки та оборони дозволить забезпечити керівництво держави обґрунтованими даними для прийняття управлінських рішень. Поєднання дистанційного зондування Землі, засобів геофізичного моніторингу та аналізу даних ЗМІ дозволяє не лише розраховувати просторово-енергетичні параметри джерел техногенних подій, а й оцінювати динаміку протікання процесів, проводити картографування потенційно небезпечних ділянок та визначати наслідки надзвичайних ситуацій. Запропонований підхід дозволить Україні мати власну незалежну систему верифікації подій, що критично важливо для протидії проведенню ворожих інформаційно-психологічних операцій та уникнення дезінформації. Крім того, геофізичні методи можуть стати унікальним інструментом технічної розвідки, що дозволить фіксувати результати вогневого ураження в глибокому тилу ворога незалежно від погодних умов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Временной и системный спектральный анализы инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных в течение техногенной катастрофы. Космічна наука і технологія. 2020. Т. 26, № 3. С. 81–96. DOI: 10.15407/knit2020.03.081.
2. Черногор Л. Ф., Лящук А. И., Шевелев Н. Б. Параметры инфразвуковых сигналов в атмосфере, сгенерированных массовыми взрывами на арсенале боеприпасов. Радиофизика и радиоастрономия. 2018. Т. 23, № 4. С. 280–293. DOI: 10.15407/rpra23.04.280.
3. Liashchuk O., Andrushchenko Yu., Topolnytskyi P., Poikhalo A., Mamariev V. Ground and space complex monitoring of natural and anthropogenic phenomena and disasters. In: Proceedings of the XIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”. 2019. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.201903261.
4. Liashchuk O., Kariahin Y., Andrushchenko Y., Tolchonov I., Kolesnykov L. Regional infrasound monitoring in Ukraine. In: EGU General Assembly 2021. 2021. EGU21-6271. DOI: 10.5194/egusphere-egu21-6271.

5. Вишняков В. Ю., Ткачук П. А. Особливості методів визначення температурних аномалій за даними ДЗЗ MODIS (TERRA) та AVHRR (NOAA): оцінка їх якості. Екологічна безпека та природокористування. 2012. № 10. С. 81–90.
6. Вишняков В. Ю., Гринюк С. В., Глущенко О. М. та ін. Автоматизація оброблення інформації дистанційного зондування Землі для вирішення завдань оперативного моніторингу території України. Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. Житомир: ЖВІРЕ, 2007. № 11. С. 44–51.
7. Костюченко Ю. В. та ін. Методика комплексної оцінки ризиків ландшафтних пожеж за даними супутникових спостережень. Космічна наука і технологія. 2011. № 6. С. 30–44.
8. Trofymchuk O., Vishnyakov V., Sheviakina N., Klymenko V., Zagorodnia S. Analysis of impacts of war on ecosystems of protected areas of Ukraine. In: Proceedings of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023. 2023. DOI: 10.5593/sgem2023v/3.2/s14.36.
9. K.Tretyak, O.Zayats, B.Kuplovskyi, A.Liashchuk, T.Korliatovych, S.Nesterenko, Yu.Bisovetskyi (2026) Assessment of the causes of the Kakhovka HPP dam collapse based on a comprehensive analysis of structural monitoring, seismic, and infrasound studies, Progress in Disaster Science, Volume 30. 100549, <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2026.100549>
10. Dando, B. D., Goertz-Allmann, B. P., Brissaud, Q., Köhler, A., Schweitzer, J., Kværna, T., & Liashchuk, A. (2023). Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, 621(7980), 767–772. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06416-7>
11. Космічне та геоінформаційне забезпечення прийняття рішень у ключових сферах національної безпеки і оборони України : монографія / за ред. О. В. Скидана. Житомир: Поліський національний університет, 2022. 355 с. ISBN 978-617-7684-81-6.
12. Satellite Imagery Gallery. *Planet Labs*. URL: <https://www.planet.com/gallery/#!/post/destruction-of-the-kakhovka-dam> (дата звернення: 24.12.2023).
13. Cansi Y. An automated seismic event processing for detection and location: the P.M.C.C. method. *Geophysical Research Letters*. 1995. Vol. 22. P. 1021–1024.
14. Osadchii V., Andrushchenko Yu., Liashchuk O. Identification of natural and technogenic seismic events by energy characteristics. *Geodynamics*. 2023. No. 2 (35). P. 99–105.
15. Андрущенко Ю. А., Лящук О. І., Осадчий В. І., Корнієнко І. В. Залежність магнітудних оцінок від потужностей хімічних вибухів на промислових кар'єрах у межах Українського щита. *Геофізичний журнал*. 2018. Т. 40, № 3. С. 157–164. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137196.
16. ReVelle D. O. Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Annals of the New York Academy of Sciences*. 1997. Vol. 822. P. 284–302.

Стаття надійшла до редакції 03.02.2026, надійшла після рецензування 27.03.2026, прийнята 15.04.2026

REFERENCES

1. Chernohor, L. F., Liashchuk, A. I., & Shevelev, N. B. (2020). Vremennoy i sistemnyy spektral'nyy analizy infrzvukovykh signalov v atmosfere, sgenerirovannykh v technie tekhnogennoy katastrofy. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*, 26(3), 81–96. <https://doi.org/10.15407/knit2020.03.081>
2. Chernohor, L. F., Liashchuk, A. I., & Shevelev, N. B. (2018). Parametry infrzvukovykh signalov v atmosfere, sgenerirovannykh massovymi vzryvami na arsenale boepripasov. *Radiophysics and Radio Astronomy*, 23(4), 280–293. <https://doi.org/10.15407/rpra23.04.280>
3. Liashchuk, O., Andrushchenko, Y., Topolnytskyi, P., Poikhalo, A., & Mamariev, V. (2019). Ground and space complex monitoring of natural and anthropogenic phenomena and disasters. In *Proceedings of the XIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201903261>

4. Liashchuk, O., Kariahin, Y., Andrushchenko, Y., Tolchono, I., & Kolesnykov, L. (2021). Regional infrasound monitoring in Ukraine. In *EGU General Assembly 2021 (EGU21-6271)*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-6271>
5. Vyshniakov, V. Y., & Tkachuk, P. A. (2012). Osoblyvosti metodiv vyznachennia temperaturnykh anomalii za danymy DZZ MODIS (TERRA) ta AVHRR (NOAA): Otsinka yikh yakosti. *Ekologichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*, 10, 81–90.
6. Vyshniakov, V. Y., Hryniuk, S. V., Hlushchenko, O. M., et al. (2007). Avtomatyzatsiia obroblennia informatsii dystantsiinoho zonduvannia Zemli dlia vyrishennia zavdan operatyvnoho monitorynhu terytorii Ukrainy. *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*, 11, 44–51.
7. Kostiuchenko, Y. V., et al. (2011). Metodyka kompleksnoi otsinky ryzykiv landshaftnykh pozhezh za danymy sputnykovykh sposterezhen. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*, 6, 30–44.
8. Trofymchuk, O., Vishnyakov, V., Sheviakina, N., Klymenko, V., & Zagorodnia, S. (2023). Analysis of impacts of war on ecosystems of protected areas of Ukraine. In *Proceedings of the 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023*. <https://doi.org/10.5593/sgem2023v/3.2/s14.36>
9. Tretyak, K., Zayats, O., Kuplovskiy, B., Liashchuk, A., Korliatovych, T., Nesterenko, S., Bisovetskyi, Yu. (2026). Assessment of the causes of the Kakhovka HPP dam collapse based on a comprehensive analysis of structural monitoring, seismic, and infrasound studies. *Progress in Disaster Science*, 30, 100549. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2026.100549>
10. Dando, B. D., Goertz-Allmann, B. P., Brissaud, Q., Köhler, A., Schweitzer, J., Kværna, T., & Liashchuk, A. (2023). Identifying attacks in the Russia–Ukraine conflict using seismic array data. *Nature*, 621(7980), 767–772 <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06416-7>
11. Skydan, O. V. (Ed.). (2022). Kosmichne ta heoinformatsiine zabezpechennia pryiniattia rishen u kluchovykh sferakh natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy. Zhytomyr: Polissia National University.
12. Planet Labs. (n.d.). Satellite imagery gallery. Retrieved December 24, 2023, from <https://www.planet.com/gallery/#1/post/destruction-of-the-kakhovka-dam>
13. Cansi, Y. (1995). An automated seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method. *Geophysical Research Letters*, 22, 1021–1024.
14. Osadchii, V., Andrushchenko, Y., & Liashchuk, O. (2023). Identification of natural and technogenic seismic events by energy characteristics. *Geodynamics*, 2(35), 99–105.
15. Andrushchenko, Y. A., Liashchuk, O. I., Osadchii, V. I., & Kornienko, I. V. (2018). Zalezhnist mahnutudnykh otsinok vid potuzhnosti khimichnykh vybukhiv na promyslovykh karierakh u mezhakh Ukrainskoho shchyta. *Geophysical Journal*, 40(3), 157–164. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137196>
16. ReVelle, D. O. (1997). Historical detection of atmospheric impacts by large bolides using acoustic-gravity waves. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 822, 284–302.

The article was received 03.02.2026, received after revision 27.03.2026, accepted 15.04.2026

Вишняков В'ячеслав Юрійович

кандидат технічних наук, доцент кафедри геопросторової підтримки та застосування космічних систем Національного університету оборони України

Адреса робоча: 03049 Україна, м. Київ, Проспект Повітряних сил, 28

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2057-0505> **e-mail:** wishnya_dzz@ukr.net

Ляшук Олександр Іванович

кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, заступник начальника Головного центру спеціального контролю (начальник науково-дослідного, випробувального центру) Національного центру управління і випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України

Адреса робоча: 12265 Україна, сел. Городок, вул. Космічна, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8690-1808> **e-mail:** alex_liashchuk@ukr.net

Мамарєв Віктор Миколайович

кандидат технічних наук, заступник начальника інформаційно-аналітичного центру Національного центру управління та випробувань космічних засобів

Адреса робоча: 01010 Україна, м. Київ, вул. Князів Острозьких, 8

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2233-7432> **e-mail:** mamarev@spacecenter.gov.ua

Андрущенко Юрій Анатолійович

кандидат геологічних наук, начальник центру збору і обробки інформації Головного центру спеціального контролю Національного центру управління і випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України

Адреса робоча: 12265 Україна, сел. Городок, вул. Космічна, 1

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8993-0113> **e-mail:** andruschenko_yuriy@ukr.net

Кошлань Олександр Анатолійович

доктор філософії, старший дослідник, доцент кафедри інфраструктурного та транспортного забезпечення Національного університету оборони України

Адреса робоча: 03049 Україна, м. Київ, Проспект Повітряних сил, 28

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9678-6463> **e-mail:** koshlan_sasha@ukr.net

УДК 532.529.522.574.695+621.039.588

Ivan Kazachkov¹, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9645-563X> **e-mail:** kazachkov.iv@ndu.edu.ua

Oleksandr Nesterenko², Doctor of Engineering Sciences, Professor, Leading Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-889X>
e-mail: aleksandrnesterenkoua@gmail.com

¹Nizhyn Mykola Gogol State University, Nizhyn, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

MODELLING AND COMPUTER SIMULATION OF THE TURBULENT TWO-PHASE JETS OF NANO FLUIDS

Abstract. *The present paper is devoted to development of the mathematical models and numerical procedures for simulation of the mixing and heat transfer features of mutually immiscible liquids in the two-fluid turbulent heterogeneous jet flow, as well as in more general case – turbulent multiphase jets. Many natural and technical processes deal with the turbulent jets of mutually immiscible liquids, which represent an important class of the modern multiphase system dynamics. Differential equations for the axially symmetrical two-dimensional stationary flow and the integral correlations in a cylindrical coordinate system by Professor Alfred Nakorchevskii are considered for the jet of fluid flowing from a nozzle into a space filled with another fluid that is not miscible with the first one. Parameters of the turbulent mixing in the two-phase jet flow are modeled and analyzed. Previously the experimental data with water and oil, as well as with liquid metals, confirmed the results of numerical computer simulation when one example was performed for simulation of the high-temperature melts' flow cooled by water in the hypothetic severe accidents at the nuclear power plant. The results obtained may be of interest for some research and industrial tasks, where the calculation of parameters of the multiphase turbulent mixing and heat transfer are important. Here the mathematical modelling and computer simulation of the mixing and heat transfer processes in the two-fluid turbulent heterogeneous jet flow of Nano fluids is considered. Many natural and technical processes deal with the turbulent jets of mutually immiscible liquids, which represent an important class of the modern multiphase system dynamics including the ones for the features of Nano fluids. Differential equations for the axially symmetrical two-dimensional stationary flow and the integral correlations in a cylindrical coordinate system were considered for the jet of fluid from a nozzle into a space filled with another fluid that is not miscible with the first one. Parameters of the turbulent mixing during the spreading of such jets are modeled and analyzed. The method was proved successfully during the half of the century in many different physical tasks including experimental studies with using the invented two-phase micro-sensor of Prof. A.I. Nakorchevskii and Dr. V.O. Chernov. The results obtained for the flow of a few Nano fluids may be of interest for the research and industrial tasks, where the calculation of multiphase turbulent mixing and heat transfer are important.*

Keywords: *mathematical modeling, computational experiment, turbulent, two-phase, jets, immiscible liquids, nanofluids.*

І.В. Казачков¹, О.В. Нестеренко²

¹Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя, м. Ніжин, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, м. Київ, Україна

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ ТУРБУЛЕНТНИХ ДВОФАЗНИХ СТРУМЕНІВ НЕЗМІШУВАНИХ РІДИН ТА НАНОРІДИН

Анотація. Ця стаття присвячена розробці математичних моделей та числових процедур для моделювання особливостей змішування та теплопередачі взаємно незмішуваних рідин у двофазному турбулентному гетерогенному струменевому потоці, а також у більш загальному випадку – турбулентних багатофазних струменів. Багато природних та технічних процесів пов'язані з турбулентними струменями взаємно незмішуваних рідин, які представляють важливий клас сучасної динаміки багатофазних систем. Диференціальні рівняння для аксіально-симетричного двовимірного стаціонарного потоку та інтегральні кореляції в циліндричній системі координат професора Альфреда Накорчевського розглянуті для струменя рідини, що витікає з сопла в простір, заповнений іншою рідиною, яка не змішується з першою. Моделюються та аналізуються параметри турбулентного змішування в двофазному струменевому потоці. Раніше експериментальні дані з водою та нафтою, а також з рідкими металами, підтвердили результати числового комп'ютерного моделювання, коли один приклад був виконаний для моделювання потоку високотемпературних розплавів, охолоджених водою, в гіпотетичних важких аваріях на атомній електростанції. Отримані результати можуть бути цікавими для деяких дослідницьких та промислових завдань, де важливим є розрахунок параметрів багатофазного турбулентного перемішування та теплопередачі. Тут розглядається математичне моделювання та комп'ютерне моделювання процесів перемішування та теплопередачі в дворідинному турбулентному гетерогенному струменевому потоці нанорідин. Багато природних та технічних процесів мають справу з турбулентними струменями взаємно незмішуваних рідин, які представляють важливий клас сучасної динаміки багатофазних систем, включаючи ті, що стосуються особливостей нанорідин. Диференціальні рівняння для аксіально-симетричного двовимірного стаціонарного потоку та інтегральні кореляції в циліндричній системі координат були розглянуті для струменя рідини з сопла в простір, заповнений іншою рідиною, яка не змішується з першою. Моделюються та аналізуються параметри турбулентного перемішування під час розтікання таких струменів. Метод був успішно випробуваний протягом півстоліття в багатьох різних фізичних завданнях, включаючи експериментальні дослідження з використанням винайденого двофазного мікросенсора професора А.І. Накорчевського та к.т.н. В.О. Чернова. Результати, отримані для потоку кількох нанорідин, можуть бути цікавими для дослідницьких та промислових завдань, де важливим є розрахунок багатофазного турбулентного перемішування та теплопередачі.

Ключові слова: математичне моделювання, обчислювальний експеримент, турбулентний, двофазний, струмені, незмішувані рідини, нанорідини.

[https:// doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.189-205](https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.189-205)

Вступ

Постановка завдання. Тривимірний друк (3D-друк), також відомий як Адитивне виробництво (АД), має багато переваг, включаючи відмову від спеціального оснащення, гнучкий та настроюваний дизайн, а також ефективне використання сировини. Струменеве нанесення сполучного матеріалу є однією з семи технологій АД, визначених ASTM та ISO [1]. Коли для виготовлення деталі використовується струменеве нанесення сполучного матеріалу, спочатку формується порошковий шар, потім створюється зелена деталь шляхом вибіркового нанесення рідкого сполучного матеріалу на порошковий шар, і, нарешті, зелена деталь ущільнюється спіканням [1]. Переваги струменевого нанесення сполучного матеріалу включають безкоштовну підтримку та легкість видалення сполучного матеріалу [2, 3]. Порошки сировини, що використовуються для струменевого нанесення сполучного матеріалу, включають нанопорошок (або субмікронний порошок) [4–7], мікропорошок [8–14] та гранульований порошок [7, 15–23]. Гранульований порошок часто готують з нанопорошку, а розмір гранул зазвичай знаходиться в мікрометровому діапазоні [21–23]. Нанопорошок оксиду алюмінію (90-187085) був придбаний у Allied High Tech, США. Мікропорошок оксиду алюмінію (26R-8S70) був придбаний у компанії Inframat, США.

Мета дослідження – показати підходи до математичного моделювання та обчислювальних експериментів турбулентних двофазних струменів незмішуваних рідин та нанорідин та виявити особливості турбулентного змішування нанопорошку оксиду алюмінію та мікропорошку при витіканні струменя з сопла в простір з водою.

Цільова спрямованість обумовлює логіку дослідження, яка направлена на постановку та вирішення наступних завдань:

- а) встановити закономірності просторового розподілу фаз двофазного потоку в просторі;
- б) визначити вплив відношення щільностей фаз та інших параметрів на характеристики змішування;
- в) з аналізу отриманих результатів знайти оптимальні режими змішування взаємно незмішуваних розглянутих рідин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз відомих публікацій показав, що турбулентні струмені нанорідин за методами багатофазних потоків не розглядалися. Таким чином, застосований в роботі оригінальний метод динаміки багатофазних течій Накорчевського дозволив отримати нові цікаві результати. Тому актуальність завдання полягає у тому, щоб описати особливості змішування нанорідин для подальшого використання в наукових і прикладних роботах.

Результати дослідження

У цьому дослідженні як метод грануляції було обрано розпилювальне ліофілізаційне сушіння [7, 22]. З описаного вище нанопорошку було приготовано суспензію із вмістом твердих речовин 20 об.%. Приготування розпочалося з додавання води та кульок для розмелювання оксиду алюмінію в пляшку з поліетилену високої щільності місткістю 1000 мл. Деякі параметри матеріалів наведено в табл. 1 за даними [24].

Таблиця 1. Видима густина та густина після усипання трьох порошків

Матеріали	Абсолютна видима густина (г/см ³)	Абсолютна густина після усипання (г/см ³)
Нанопорошок	0,29±0,001	0,55±0,012
Мікропорошок	2,09±0,004	2,38±0,019
Гранульований порошок	0,46±0,006	0,56±0,007

Вода, оксид алюмінію, нанопорошок та мікропорошок, що розглядаються в статті, є наступними:

1. Нанопорошок оксиду алюмінію витікає з сопла в простір з водою, відношення щільностей $\rho_{21}=0,55/1=0,55$.

2. Мікропорошок тече з сопла в простір з водою $\rho_{21}=2,38/1=2,38$.

3. Навпаки, вода подається з сопла в нанопорошок та мікропорошок: $\rho_{21}=1/0,55=1,82$, $\rho_{21}=1/2,38=0,42$.

Істинна щільність – це співвідношення маси та об'єму (істинного об'єму) зразка, за винятком об'єму відкритих пор, закритих пор та міжчастинкових порожнин. Скелетна щільність: це відношення маси до об'єму (скелетного об'єму) частинок, за винятком як міжчастинкових порожнин, так і відкритих пор. Щільність після постукування: це щільність, виміряна механічним постукуванням по контейнеру з частинками для створення регулярної вібрації, яка переставляє частинки порошку. Вимірювання щільності після постукування зазвичай проводиться за допомогою вимірювача щільності після постукування. Насипна щільність: це щільність, виміряна після того, як частинки вільно заповнили стандартний контейнер за певних умов, тобто маса частинок на одиницю об'єму, коли вони нещільно упаковані [25].

Метод моделювання багатофазних турбулентних потоків

Параметри (щільність рідини, швидкість потоку, температура тощо) суміші в турбулентному багатофазному потоці розглядаються відповідно до методу, запропонованого професором Накорчевським [26], розробленого та описаного в багатьох публікаціях, наприклад, [26-31]. Аналог рівнянь Нав'є-Стокса в пограничному шарі було отримано в такому вигляді [26]:

$$\sum_{i=1}^m \left[\frac{\partial}{\partial x} (y \rho_i B_i u_i) + \frac{\partial}{\partial y} (y \rho_i B_i v_i) \right] = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m \rho_i B_i (u_i \frac{\partial u_i}{\partial x} + v_i \frac{\partial u_i}{\partial y}) = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{y} \frac{\partial}{\partial y} \left[y \sum_{i=1}^m B_i \tau_i \right],$$

де $a^l(t) = \sum_{i=1}^m B_i(t) a_i^l(t)$, $\sum_{i=1}^m B_i = 1$. Функція-індикатор $B_i(t)$ введена для фаз

багатофазного потоку наступним чином: $B_1=1$, якщо в даній точці течії присутня тільки перша фаза, $B_2=0$. І навпаки, $B_1=0$, $B_2=1$ – якщо тільки друга фаза.

У стаціонарних рівняннях (1) для потоку нестисливих рідин, записаних у циліндричній системі координат, знаходяться: p – тиск, ρ – щільність, u, v – поздовжня та поперечна складові швидкості, τ – турбулентне напруження для i -ї фази. Всі параметри потоку усереднюються на характерному інтервалі за

вибраним часом. Індекс m належить значенням на осі потоку (осі симетрії). Функцію-індикатор фази в багатофазному потоці можна розглядати як математичне очікування, на відміну від інших багатофазних підходів [8–10], які базуються на введенні об'ємного питомого вмісту фази в багатофазному потоці. Тим не менш, використання функції-індикатора дозволяє обчислити об'ємний питомий вміст фаз, який був введений іншими багатофазними підходами. Розробка моделі двофазного струменя незмішуваних рідин виконана згідно з рис. 1. Схематичне зображення показано на рис. 2, де r_0 – радіус сопла, u_{01} – швидкість на зрізі сопла. Конічна поверхня 1 на рис. 1 є межею однорідного потенційного ядра a , внутрішній підшар b_1 містить рідину, що вводиться з оточуючого середовища, як дисперсну фазу, тоді як зовнішній підшар b_2 містить рідину, що виходить з сопла, як дисперсну фазу. Внутрішній та зовнішній підшари розділені поверхнею фазової інверсії 2; а поверхня 3 розділяє турбулентну та ламінарну зони потоку 3, яка є найбільш невизначеною; 4 – зовнішня конічна поверхня осесиметричної зони змішування (умовно гладка).

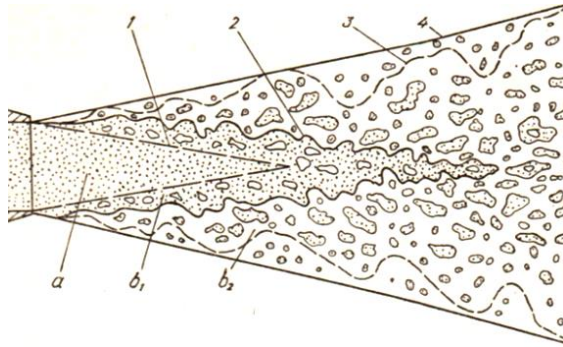


Рис. 1. Загальний вигляд багатофазного турбулентного струменя

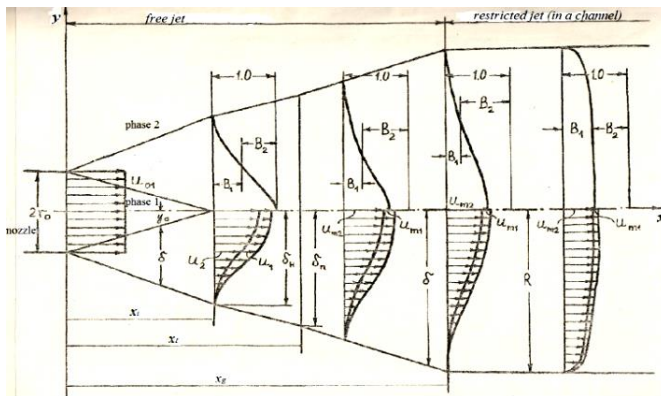


Рис. 2. Схема двофазного турбулентного струменя, обмеженого каналом при x_g

Структурна схема процесу змішування на рис. 2 спрощена: початкова частина довжини x_1 з приблизно лінійними межами для конічної поверхні (у циліндричній системі координат) внутрішнього ядра першої фази та зони змішування між внутрішньою та зовнішньою межами струменя. Турбулентна зона містить фрагменти фаз, оскільки незмішувані рідини мають поведінку,

подібну до окремих фаз, з їх міжфазними множинними поверхнями. Перша фаза в потенційному ядрі повністю витрачається в початковій частині зони змішування. Потім слідує коротка транзитна область. Після цього починається основна частина двофазного струменя, при цьому дві фази добре перемішані по всьому шару струменя. Зовнішня межа зони змішування визначається нульовою поздовжньою швидкістю другої фази та нульовою поперечною швидкістю першої фази (друга фаза всмоктується з нерухомого оточення в зону змішування). Індикатор функції першої фази $B_1(t)$ дорівнює нулю на зовнішній межі розділу, оскільки вона відсутня в навколишньому середовищі. Аналогічно, індикатор функції $B_2(t)$ дорівнює нулю на межі потенційного ядра, поверхні розділу першої фази, що витікає з сопла. У першому підході впливом маси, в'язких та капілярних сил нехтується.

З урахуванням вищезазначеного, граничні умови такі [1]:

$$\begin{aligned} y=y_0, \quad u_i=u_{0i}, \quad v_i=0, \quad \tau_i=0, \quad B_1=1, \quad \partial B_1 / \partial \eta = 0; \\ y=y_0+\delta, \quad u_i=0, \quad v_i=0, \quad \tau_i=0, \quad B_1=0. \end{aligned} \quad (2)$$

Залежність функції-індикатора B_1 від поздовжньої координати x вводиться через її другу похідну на межі струменя $y=y_0$: $\partial^2 B_1 / \partial \eta^2 = h(x)$.

Апроксимація профілів швидкості та функції-індикатора

Турбулентне напруження у фазі визначається «новою» формулою Прандтля $\tau_i = \rho_i \kappa_i \delta u_{mi} \partial u_i / \partial y$, де κ_i – коефіцієнт турбулентного перемішування для i -ї фази, δ – ширина шару перемішування. Поліноміальні наближення для профілів швидкості та інших функцій були отримані на основі граничних умов (2) [26–28], наприклад:

$$u_1 / u_{01} = 1 - 4\eta^3 + 3\eta^4, \quad u_2 / u_{02} = 1 - 6\eta^2 + 8\eta^3 - 3\eta^4, \quad (3), (4)$$

$$B_1 = B_1^{(0)} = 1 - \eta^3 + 0.5\eta^2(1-\eta)h(x), \quad h \in [-6, 0], \quad (5)$$

$$B_1 = B_1^{(1)} = 1 - 4\eta^3 + 3\eta^4 + 0.5\eta^2(1-\eta)^2 h(x), \quad h \in [-12, -6],$$

$$B_1 = B_1^{(2)} = 1 - 10\eta^3 + 15\eta^4 - 6\eta^5 + 0.5\eta^2(1-\eta)^3 h(x), \quad h \in [-20, -12],$$

де $\eta = (y - y_0) / \delta$. Функція $h(x) = \left(\partial^2 B_1 / \partial \eta^2 \right)_{\eta=0}$ відповідає за залежність функції-індикатора фаз B_1 від координати x , вона може змінюватися в діапазоні $h \leq 0$ через вимоги своєї природи. Перше наближення в (5) показує обмежене застосування в діапазоні $h \leq 0$, тоді як поза цією областю воно не задовольняє граничні умови (2) та умову $0 \leq B_1(\eta) \leq 1, \quad \forall \eta \in [0, 1]$. Отже, всі наступні наближення $B_1(\eta)$ у (5) були отримані як перехід кусково-неперервної функції-індикатора $B_1^{(n)}$ до її наступного наближення за умови, що похідна по η відносно точки $\eta=1$ дорівнює нулю до $(n+1)$ -го порядку. Ці функції мають розриви в точках переходу постійної характеристичної функції $B_1^{(n)}(\eta, h)$ від одного інтервалу наближення до іншого (перша похідна має розрив у цих точках). Перше наближення $B_1(\eta)$ у (5) обмежене застосуванням в діапазоні $h \in [-6, 0]$, тоді як поза цією областю воно не задовольняє граничні умови (2) та умову $0 \leq B_1(\eta) \leq 1, \quad \forall \eta \in [0, 1]$. Тому всі наступні наближення $B_1(\eta)$ у (5) були

отримані як перехід кусково-неперервної функції-індикатора $B_1^{(n)}$ до її наступного наближення за умови, що похідна відносно точки $\eta = 1$ дорівнює нулю до $(n+1)$ -го порядку. Ці функції мають розриви в точках переходу постійної характеристичної функції $B_1^{(n)}(\eta, h)$ від одного регіонального наближення до іншого (перша похідна має розрив у цих точках). Перевагою таких наближень є те, що всі функції $B_1^{(n)}$ плавно переходять з однієї області $h(x)$ до наступної. Кожна функція $B_1^{(n)}$ точно збігається з попередньою $B_1^{(n-1)}$ на межі спряження, де закінчується $B_1^{(n-1)}$ і починається $B_1^{(n)}$. Фізичний зміст варіативних наближень визначається залежністю розподілу фаз у шарі змішування від співвідношення густин фаз змішування: чим густіша навколишня рідина, тим коротше проникнення першої, легшої фази, у шар змішування.

Недоліком вищезазначених наближень є зростаюча складність функцій $B_1^{(n)}$ в аналітичних розрахунках, з якою, тим не менш, легко боротися за допомогою сучасних комп'ютерних аналітичних розрахунків. Неможливо отримати загальне наближення для $B_1(\eta, h)$, що задовольняє граничні умови (2) у всьому діапазоні за параметром i_0 (через вимогу варіації B_1 від 0 до 1).

Поліноміальні наближення для u_2 , B_1 залишаються однаковими на початковій частині струменя, але для функції u_1 наближення таке:

$$u_1 / u_{m1} = 1 - 3\eta^2 + 2\eta^3. \quad (6)$$

Усі поліноміальні апроксимації (3)-(6) показано на рис. 3. Реальні профілі для багатофазного потоку представлені як добуток відповідного профілю, помножений на його функцію-індикатор.

Інтегральні рівняння для початкової ділянки струменя

На основі (3)-(5) було отримано інтегральні кореляції для двофазного турбулентного струменя [26, 27] шляхом інтегрування рівнянь збереження маси та імпульсу (1) з граничними умовами (2) для повного поперечного перерізу потоку $y = y_0 + \delta$, а також збереження імпульсу для $y = y^*$ відповідно.

Математична модель в безрозмірній формі

Система рівнянь для початкової частини струменя перетворюється до наступної безрозмірної форми з масштабами r_0 , δ , u_{0i} для поздовжніх та поперечних координат і швидкості відповідно:

$$y_0^2 + 2\delta \sum_{j=1}^2 y_0^{2-j} \delta^{j-1} a_j = 1, \quad y_0^2 + 2\delta \sum_{j=1}^2 y_0^{2-j} \delta^{j-1} (a_{j+2} + i_0 b_{j+2}) = 1, \quad (7)$$

$$(1 - u_1^*) y_0 \frac{dy_0}{d\zeta} + \frac{d}{d\zeta} \delta \sum_{j=1}^2 y_0^{2-j} \delta^{j-1} (a_{j+2}^* + i_0 b_{j+2}^*) - \quad (8)$$

$$\frac{d}{d\zeta} \delta \sum_{j=1}^2 y_0^{2-j} \delta^{j-1} (a_j^* u_1^* + i_0 b_j^* u_2^*) = (y_0 + \delta \eta^*) \sum_{j=1}^2 B_j^* \left(\frac{\partial u_j}{\partial \eta} \right)^* (i_0 \kappa_{21})^{j-1}.$$

Тут: $\bar{y}_0 = y_0 / r_0$, $\bar{\delta} = \delta / r_0$, $\eta = (y - y_0) / \delta$, $\bar{x} = x / r_0$, $\varsigma = \kappa_1 \bar{x}$,
 $s_0 = u_{02} / u_{01}$, $i_0 = ns_0^2$, $n = \rho_2 / \rho_1$, $\kappa_{21} = \kappa_2 / \kappa_1$, $a_i = a_{i1} + a_{i2}h$,
 $b_i = b_{i1} + b_{i2}h$, $a_i = \int_0^1 B_1 \bar{u}_1 \eta^{j-1} d\eta$, $b_i = \int_0^1 B_2 \bar{u}_2 \eta^{j-1} d\eta$ ($i=1, 2$);
 $a_i = \int_0^1 B_1 \bar{u}_1^2 \eta^{j-1} d\eta$, $b_i = \int_0^1 B_2 \bar{u}_2^2 \eta^{j-1} d\eta$ ($i=3, 4$); $j=1, 2$.

Розраховані значення інтегральних параметрів у (7), (8) були виконані в діапазоні зміни функції $h(x)$ відповідно до апроксимації профілів швидкості (3), (4) та функції-індикатора фази B_1 (5). Як показано нижче, область параметра $h(x)$ переважно покривається у (5) для достатньо широкого співвідношення густин змішуваних рідких фаз. Коефіцієнти a_{ij} , b_{ij} , згідно з (11), (3)-(5), представлені в табл. 2 та табл. 3.

Таблиця 2. Інтегральні параметри a_{ij} моделі для різних областей функції-індикатора B_1

a_{ij} для h :	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	a_{31}	a_{32}	a_{41}	a_{42}
$h \in [0, -6]$	0.5464	0.0208	0.1667	0.0101	0.4604	0.0139	0.1198	0.0059
$[-6, -12]$	0.4857	0.0107	0.1333	0.0046	0.4250	0.0080	0.1027	0.0030
$[-12, -20]$	0.4310	0.0062	0.1065	0.0023	0.3884	0.0049	0.0866	0.0017
$[-20, -30]$	0.3844	0.0038	0.0859	0.00013	0.3542	0.0032	0.0728	0.0010

Таблиця 3. Інтегральні параметри b_{ij} моделі для різних областей функції-індикатора B_1

b_{ij} для h	b_{11}	b_{12}	b_{21}	b_{22}	b_{31}	b_{32}	b_{41}	b_{42}
$h \in [0, -6]$	0.0179	-0.0101	0.0095	-0.0042	0.0054	-0.0048	0.0023	-0.0016
$[-6, -12]$	0.0429	-0.0060	0.0214	-0.0022	0.0149	-0.0032	0.0059	- 0.00097
$[-12, -20]$	0.0690	-0.0038	0.0327	-0.0012	0.0625	-0.0023	0.0098	- 0.00062
$[-20, -30]$	0.0939	-0.0025	0.0424	- 0.00076	0.0390	-0.0016	0.0141	- 0.00042

Інтегральну кореляцію для частини шару змішування в системі (10) розглядали при $\eta = 0.5$. Відповідні коефіцієнти a_{ij}^* , b_{ij}^* для цієї середньої ділянки шару змішування наведено в табл. 4 та 5.

Таблиця 4. Інтегральні параметри a_{ij}^* моделі для різних областей функції-індикатора B_1

a_{ij}^* для h :	a_{11}^*	a_{12}^*	a_{21}^*	a_{22}^*	a_{31}^*	a_{32}^*	a_{41}^*	a_{42}^*
$h \in [0, -6]$	0.4436	0.0110	0.1029	0.0038	0.4103	0.0094	0.0902	0.0032
$[-6, -12]$	0.4206	0.0071	0.0941	0.0024	0.3912	0.0062	0.0831	0.0020
$[-12, -20]$	0.3920	0.0062	0.0836	0.0015	0.3673	0.0042	0.0745	0.0012
$[-20, -30]$	0.3619	0.0033	0.0730	0.00097	0.3416	0.0029	0.0657	0.00084

Таблиця 5. Інтегральні параметри b_{ij}^* моделі для різних областей функції-індикатора B_1

b_{ij}^* для h :	b_{11}^*	b_{12}^*	b_{21}^*	b_{22}^*	b_{31}^*	b_{32}^*	b_{41}^*	b_{42}^*
$h \in [0, -6]$	0.0075	-0.0142	0.0028	-0.0047	0.0039	-0.0085	0.0014	-0.0025
$[-6, -12]$	0.0214	-0.0048	0.0079	-0.0015	0.0114	-0.0030	0.0039	- 0.00083
$[-12, -20]$	0.0392	-0.0033	0.0141	- 0.00096	0.0214	-0.0022	0.0071	- 0.00057
$[-20, -30]$	0.0585	-0.0023	0.0206	- 0.00064	0.0328	-0.0016	0.0106	- 0.00039

Окрім вищезазначеного, для безрозмірних параметрів ми зберігаємо ті ж позначення, що й для розмірних. Тільки в (11) це зазначено для уточнення безрозмірних позначень. Коефіцієнт ковзання s_0 вважається постійним. Граничні умови (2) для (11) перетворюються як

$$\zeta=0, y_0=1, \delta=0; \quad \zeta=\zeta_i, y_0=0, \delta=\delta_i; \quad (9)$$

де ζ_i, δ_i – безрозмірна довжина струменя та його максимальний радіус (в кінці початкової ділянки). Характеристики $y_0(\zeta), \delta(\zeta), h(\zeta)$ обчислюються з (8), (9). Потім усі інші отримуються для заданих значень основних параметрів: i_0, κ_1, κ_2 . Перший параметр є дещо невизначеним через труднощі з оцінкою ковзання фаз, тоді як два інші відомі з експериментальних досліджень для конкретних умов. Основною проблемою перевірки математичної моделі на відповідність експериментальним даним є правильна оцінка коефіцієнтів турбулентного перемішування κ_1, κ_2 у кожному конкретному випадку. Але перевагою моделі є можливість мати всі характеристики потоку разом з їх належністю до певної фази через функції B_1, B_2 . Так, обчислюються розподіл поперечних швидкостей, взаємодії на межі розділу, коефіцієнтів об'ємного q та масового розходу g , а також кінетичної енергії e_i для фаз у потоці [26].

Для короткої перехідної частини струменя немає розробленої обґрунтованої схеми, тому вона тут не розглядається. Основна частина струменя розглядається після короткої перехідної частини. Метод добре розроблений та підтверджений експериментальними даними [26]. Безрозмірна система рівнянь (8), (9) для основної частини також представлена в [26].

Розв'язання крайової задачі для початкової ділянки струменевої течії

Розв'язок крайової задачі (8), (9) дозволяє отримати параметри для початкової частини струменя за заданими значеннями параметрів i_0 , κ_{21} . Причому, якщо перший параметр задається відповідно до відношення густини змішуваних рідин (може тільки ще залежати від невідомого ковзання фаз s_0), то варіювання в обчисленнях відношення коефіцієнтів турбулентного змішування κ_{21} означає різні можливі рідини. Обчислювальні експерименти виявили основні особливості потоку. Зазначено розподіли швидкостей для фаз (u_1 , u_2) та функцій-індикаторів фаз (B_1 , B_2), а також значення параметрів у поперечному перерізі сопла. Система (8) містить два алгебраїчних та одне диференціальне рівняння. З алгебраїчних рівнянь отримують функції $y_0(h)$, $\delta(h)$, а потім диференціальне рівняння виражається у стандартній формі

$$dh/d\zeta = F(h(\zeta), i_0, \kappa_{21}),$$

для чисельного розв'язку.

Систему рівнянь можна розв'язати чисельно в загальному випадку, але ми застосовували декілька різних методів для отримання більш детальної картини фізичних явищ, для більш повного розуміння основних характеристик системи, з максимально можливою кількістю аналітичних виразів, що показують явні функції. Діапазон зміни функції $h(\zeta)$ визначається підстановкою граничних умов у функції $y_0(h)$, $\delta(h)$, таким чином ми отримуємо наступне:

$$h_0 = h(0) = \frac{a_{11} - a_{31} - i_0 b_{31}}{a_{32} - a_{12} + i_0 b_{32}}, \quad h_i = h(\zeta_i) = \frac{a_{21} - a_{41} - i_0 b_{41}}{a_{42} - a_{22} + i_0 b_{42}}. \quad (10)$$

Функції $h_0(i_0)$, $h_i(i_0)$ у (10) мають розриви в точках переходу постійної функції $B_1(\eta, h)$ від одного діапазону наближення до іншого (перша похідна має розрив у цих точках). Результати комп'ютерного моделювання представлені нижче.

Розповсюдження струменя мікропорошку алюмінію у басейні з водою

Для цього випадку відношення густини дорівнює 2,38. Розрахунки велись для співвідношення змінних коефіцієнтів турбулентного перемішування в діапазоні від 0,1 до 10. Деякі результати розрахунків представлені на рис. 4, 5.

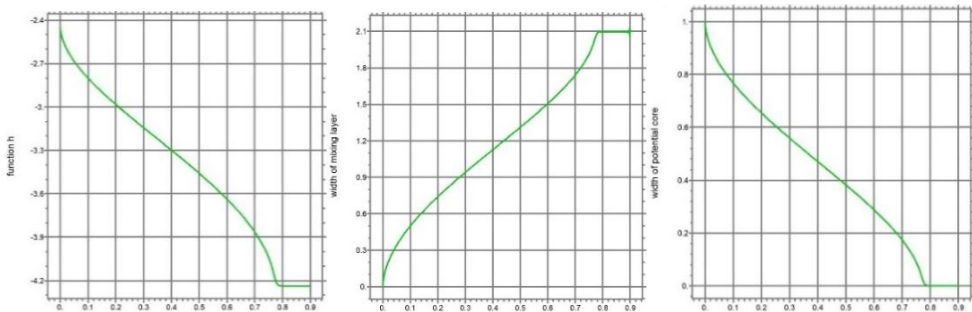


Рис. 4. Струмін мікропорошку алюмінію у басейні з водою. Функції $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=2.38$, $\kappa_{21}=0.5$; $\zeta = \kappa_1 \bar{x}$

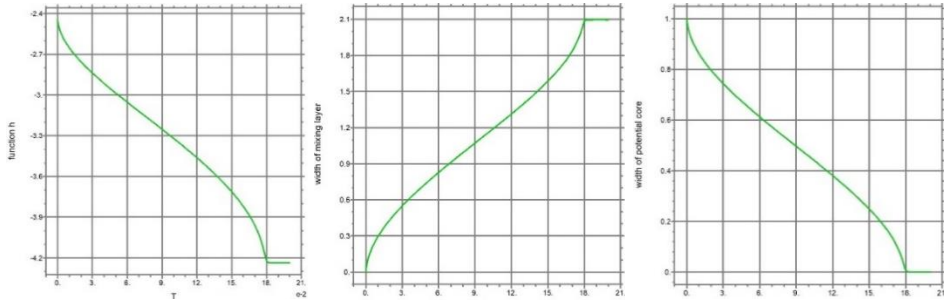


Рис. 5. Струмінь мікропорошку алюмінію у басейні з водою. Функції $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=2.38$, $\kappa_{21}=5.0$; $\zeta = \kappa_1 \bar{x}$

Струмінь води в басейні алюмінієвого нанопорошку

Мікро- і нанопорошки поведуться як рідини в русі. Турбулентний струмінь води, що поширюється в просторі нанопорошку, досліджувався з коефіцієнтом густини, зазначеним вище, 1,82. Деякі результати розрахунків для варійованих значень коефіцієнтів турбулентного змішування зі співвідношенням від 0,1 до 5,0 можна побачити на рис. 6, 7.

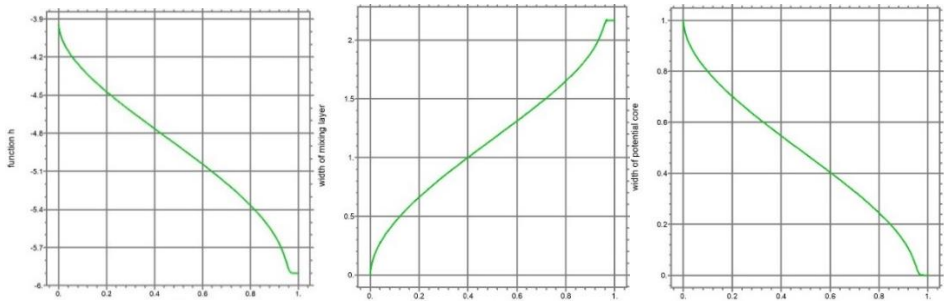


Рис. 6. Струмінь води у басейні алюмінієвого нанопорошку. Functions $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=1.82$, $\kappa_{21}=0.5$; $\zeta = \kappa_1 \bar{x}$

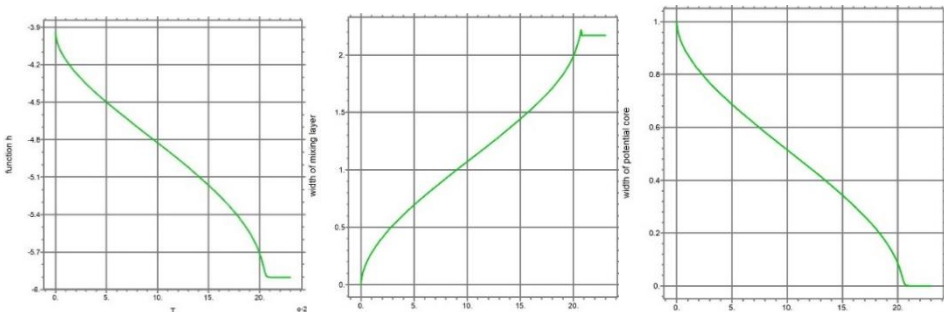


Рис. 7. Струмінь води у басейні алюмінієвого нанопорошку. Functions $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=1.82$, $\kappa_{21}=5.0$; $\zeta = \kappa_1 \bar{x}$

Струмінь води в мікропорошку алюмінію

Турбулентний струмінь води, що поширюється в середовищі мікропорошку Al, досліджувався з коефіцієнтом щільності, зазначеним вище, 0,42. Результати для різних значень коефіцієнтів турбулентного змішування зі співвідношенням від 0,1 до 5,0 можна побачити на рис. 8, 9.

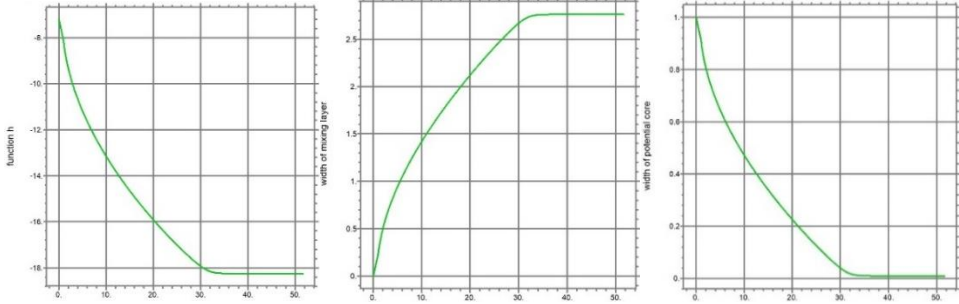


Рис. 8. Струмінь води у басейні алюмінієвого мікропорошку. Functions $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=0.42$, $\kappa_{21}=5.0$

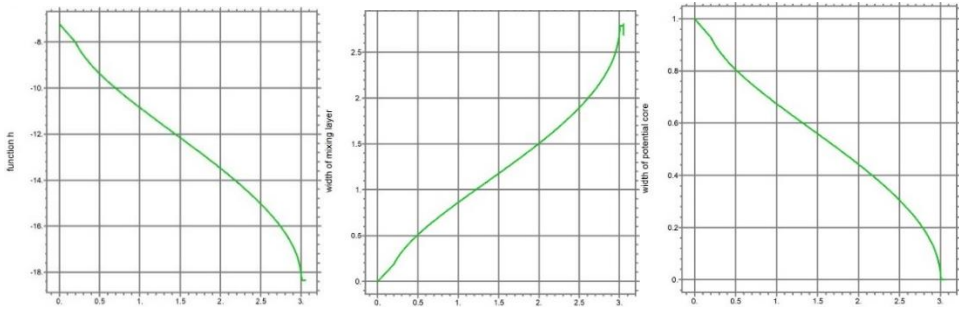


Рис. 9. Струмінь води у басейні алюмінієвого мікропорошку. Functions $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=0.42$, $\kappa_{21}=5.0$

Струмінь нанопорошку алюмінію у воді

Турбулентний струмінь нанопорошку алюмінію, що поширюється у воді, досліджувався з коефіцієнтом щільності 0,55, як зазначено вище. Два результати для різних значень коефіцієнтів турбулентного змішування зі співвідношенням від 0,1 до 5,0 можна побачити на рис. 10, 11.

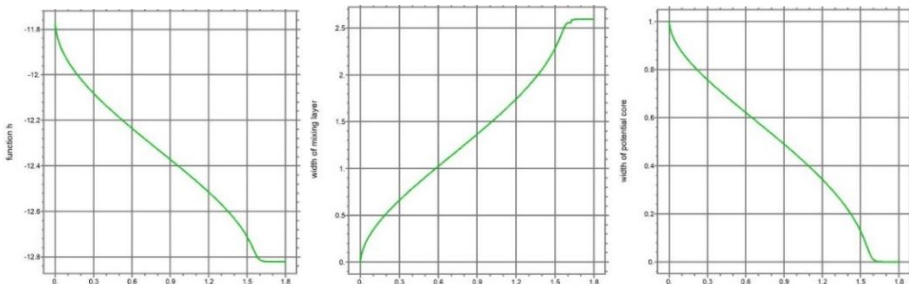


Рис. 10. Струмінь нанопорошку алюмінію у воді. Functions $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=0.55$, $\kappa_{21}=0.5$

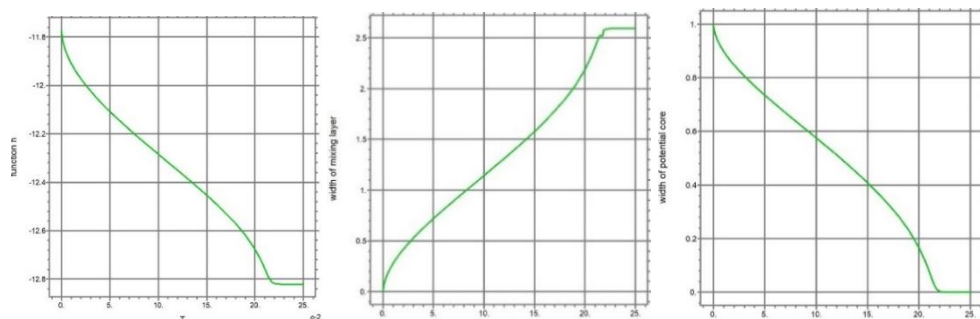


Рис. 11. Струмінь води у басейні алюмінієвого мікропорошку. Functions $h(\zeta)$, $\delta(\zeta)$, $y_0(\zeta)$ by $i_0=0.55$, $\kappa_{21}=5.0$

Висновки та перспективи подальших досліджень

Сформульовано інтегральну модель на основі фазових індикаторів для осесиметричних турбулентних струменів двох незмішуваних рідин з контрастом їх щільностей. Ця модель розширює класичну теорію гетерогенних струменів, включаючи фазово-роздільний перенос імпульсу, зберігаючи при цьому аналітичну простежуваність. Класична поведінка турбулентних струменів відновлюється в межі однієї щільності, тоді як контраст щільностей призводить до систематичних відхилень, зумовлених інерційним дисбалансом. На основі результатів моделювання для представлених нано- та мікропорошків алюмінію та їх струменевого потоку з водою можна розглянути оптимальний режим змішування порошків з водою. Це корисно для розуміння особливостей змішування та теплопередачі, розрахунку необхідної концентрації порошку у воді та характеристик масо- та теплопередачі. Метод моделювання гетерогенних струменів взаємно незмішуваних рідин вперше застосовано для опису турбулентного струминного змішування нанорідин, що в майбутньому буде розповсюджено також на інші раніше невідомі випадки для встановлення важливих особливостей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ASTM International. (2015). *ISO/ASTM 52900:2015 additive manufacturing—General principles—Terminology*. ASTM International.
2. Du, W., Ren, X., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Ceramic binder jetting additive manufacturing: A literature review on density. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(4), 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.280>
3. Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Metal binder jetting additive manufacturing: A literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(9), 1–45. <https://doi.org/10.1115/1.4047430>
4. Qian, C., & Sun, J. (2013). Fabrication of the porous hydroxyapatite implant by 3D printing. *Journal of Ceramic Processing Research*, 14(4), 513–516. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>
5. Tarafder, S., Davies, N. M., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2013). 3D printed tricalcium phosphate bone tissue engineering scaffolds: Effect of SrO and MgO doping on in vivo osteogenesis in a rat distal femoral defect model. *Biomaterials Science*, 1(12), 1250–1259. <https://doi.org/10.1039/C3BM60132C>

6. Tarafder, S., Dernell, W. S., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2015). SrO- and MgO-doped microwave sintered 3D printed tricalcium phosphate scaffolds: Mechanical properties and in vivo osteogenesis in a rabbit model. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 103(3), 679–690. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33239>
7. Miao, G., Du, W., Moghadasi, M., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Ceramic binder jetting additive manufacturing: Effects of granulation on properties of feedstock powder and printed and sintered parts. *Additive Manufacturing*, 36, Article 101542. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101542>
8. Bai, Y., Wagner, G., & Williams, C. B. (2015). Effect of bimodal powder mixture on powder packing density and sintered density in binder jetting of metals. In *Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 758–771). Austin, TX.
9. Butscher, A., Bohner, M., Roth, C., Ernstberger, A., Heuberger, R., Doebelin, N., Rudolf Von Rohr, P., & Müller, R. (2012). Printability of calcium phosphate powders for three-dimensional printing of tissue engineering scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 8(1), 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.08.027>
10. Zocca, A., Gomes, C. M., Bernardo, E., Muller, R., Gunster, J., & Colombo, P. (2013). LAS glass-ceramic scaffolds by three-dimensional printing. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(9), 1525–1533. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.12.012>
11. Lanzetta, M., & Sachs, E. (2001). The line formation with alumina powders in drop on demand three-dimensional printing. In *Proceedings of the First International Seminar on Progress in Innovative Manufacturing Engineering* (pp. 197–204). Sestri Levante.
12. Sun, C., Tian, X., Wang, L., Liu, Y., Wirth, C. M., Günster, J., Li, D., & Jin, Z. (2017). Effect of particle size gradation on the performance of glass-ceramic 3D printing process. *Ceramics International*, 43(1), 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.197>
13. Du, W., Ren, X., Chen, Y., Ma, C., Radovic, M., & Pei, Z. (2018). Model guided mixing of ceramic powders with graded particle sizes in binder jetting additive manufacturing. In *ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. 1–9). College Station, TX. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6651>
14. Du, W., Roa, J., Hong, J., Liu, Y., Pei, Z., & Ma, C. (2021). Binder jetting additive manufacturing: Effect of particle size distribution on density. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(9), 091002_1–091002_26. <https://doi.org/10.1115/1.4050306>
15. Suwanprateeb, J., Sanngam, R., & Panyathanmaporn, T. (2010). Influence of raw powder preparation routes on properties of hydroxyapatite fabricated by 3D printing technique. *Materials Science and Engineering C*, 30(4), 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2010.02.014>
16. Irsen, S. H., Leukers, B., Höckling, C., Tille, C., & Seitz, H. (2006). Bioceramic granulates for use in 3D printing: Process engineering aspects. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37(6), 533–537. <https://doi.org/10.1002/mawe.200600033>
17. Gildenhaar, R., Knabe, C., Gomes, C., Linow, U., Houshmand, A., & Berger, G. (2011). Calcium alkaline phosphate scaffolds for bone regeneration 3D-fabricated by additive manufacturing. *Key Engineering Materials*, 493–494, 849–854. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.493-494.849>
18. Ben, Y., Zhang, L., Wei, S., Zhou, T., Li, Z., Yang, H., Wang, Y., Selim, F. A., Wong, C., & Chen, H. (2017). PVB modified spherical granules of β -TCP by spray drying for 3D ceramic printing. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.008>
19. Seitz, H., Deisinger, U., Leukers, B., Detsch, R., & Ziegler, G. (2009). Different calcium phosphate granules for 3-D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Advanced Engineering Materials*, 11(5), 41–46. <https://doi.org/10.1002/adem.200800334>
20. Cox, S. C., Thornby, J. A., Gibbons, G. J., Williams, M. A., & Mallick, K. K. (2015). 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering C*, 47, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.024>

21. Chumnanklang, R., Panyathanmaporn, T., Sitthiseripratip, K., & Suwanprateeb, J. (2007). 3D printing of hydroxyapatite: Effect of binder concentration in pre-coated particle on part strength. *Materials Science and Engineering C*, 27(4), 914–921. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.11.004>
22. Du, W., Miao, G., Liu, L., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Binder jetting additive manufacturing of ceramics: Feedstock powder preparation by spray freeze granulation. In *ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. 1–6). Erie, PA. <https://doi.org/10.1115/MSEC2019-3001>
23. Du, W., Miao, G., Liu, L., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Binder jetting additive manufacturing of ceramics: Comparison of flowability and sinterability between raw and granulated powders. In *ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. 1–8). Erie, PA. <https://doi.org/10.1115/MSEC2019-2983>
24. Domiri Ganji, D., Mahboobtosi, M., & Nadalinia Chari, F. (2025). Nonlinear radiation in entropy generation MHD flow of penta-hybrid nanofluids: Effects of variable thermal conductivity, viscous dissipation and nonlinear convection. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 18(2), Article 101524. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101524>
25. Jalili, B., Majidi Zar, P., Liu, D., Ji, C.-H., Jalili, P., Abdelmohimen, M. A. H., & Domiri Ganji, D. (2024). Thermal study of MHD hybrid nanofluids confined between two parallel sheets: Shape factors analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, Article 105229. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105229>
26. Накорчевский, А.И. (1980). *Гетерогенные турбулентные струи*. Киев: Наукова думка.
27. Накорчевский, А.И., & Казачков, И.В. (1979). Расчет неоднородной турбулентной струи. В кн.: *Системы автоматизации непрерывных технологических процессов* (pp. 68-79). Институт кибернетики НАНУ.
28. Kazachkov, I. (2025). *Turbulent two-phase jets of mutually immiscible liquids: Mixing and heat transfer*. Cambridge Scholars Publishing.
29. Kazachkov, I. V. (2018). Approaches for mathematical modeling and experimental study of the turbulent flows of mutually immiscible liquids (oil-water). *International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering*, 4(1), 70–81. <https://doi.org/10.20431/2454-7980.0401008>
30. Казачков, И.В. (1980). Математическое моделирование неоднородных турбулентных струй в цилиндрической камере. *Автоматика*, 13, 1-6.
31. Накорчевский, А.И., & Басок, Б.И. (2001). *Гидродинамика и теплопередача в гетерогенных системах и устройствах пульсирующего типа*. Киев: Наукова Думка.

Стаття надійшла до редакції 17.02.2026, надійшла після рецензування 23.03.2026, прийнята 22.04.2026

REFERENCES

1. ASTM International. (2015). *ISO/ASTM 52900:2015 additive manufacturing—General principles—Terminology*. ASTM International.
2. Du, W., Ren, X., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Ceramic binder jetting additive manufacturing: A literature review on density. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(4), 1–66. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.03.280>
3. Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Metal binder jetting additive manufacturing: A literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(9), 1–45. <https://doi.org/10.1115/1.4047430>
4. Qian, C., & Sun, J. (2013). Fabrication of the porous hydroxyapatite implant by 3D printing. *Journal of Ceramic Processing Research*, 14(4), 513–516. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-49514-8>

5. Tarafder, S., Davies, N. M., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2013). 3D printed tricalcium phosphate bone tissue engineering scaffolds: Effect of SrO and MgO doping on in vivo osteogenesis in a rat distal femoral defect model. *Biomaterials Science*, 1(12), 1250–1259. <https://doi.org/10.1039/C3BM60132C>
6. Tarafder, S., Dernell, W. S., Bandyopadhyay, A., & Bose, S. (2015). SrO- and MgO-doped microwave sintered 3D printed tricalcium phosphate scaffolds: Mechanical properties and in vivo osteogenesis in a rabbit model. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 103(3), 679–690. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33239>
7. Miao, G., Du, W., Moghadasi, M., Pei, Z., & Ma, C. (2020). Ceramic binder jetting additive manufacturing: Effects of granulation on properties of feedstock powder and printed and sintered parts. *Additive Manufacturing*, 36, Article 101542. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101542>
8. Bai, Y., Wagner, G., & Williams, C. B. (2015). Effect of bimodal powder mixture on powder packing density and sintered density in binder jetting of metals. In *Proceedings of the International Solid Freeform Fabrication Symposium* (pp. 758–771). Austin, TX.
9. Butscher, A., Bohner, M., Roth, C., Ernstberger, A., Heuberger, R., Doebelin, N., Rudolf Von Rohr, P., & Müller, R. (2012). Printability of calcium phosphate powders for three-dimensional printing of tissue engineering scaffolds. *Acta Biomaterialia*, 8(1), 373–385. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.08.027>
10. Zocca, A., Gomes, C. M., Bernardo, E., Muller, R., Gunster, J., & Colombo, P. (2013). LAS glass-ceramic scaffolds by three-dimensional printing. *Journal of the European Ceramic Society*, 33(9), 1525–1533. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2012.12.012>
11. Lanzetta, M., & Sachs, E. (2001). The line formation with alumina powders in drop on demand three-dimensional printing. In *Proceedings of the First International Seminar on Progress in Innovative Manufacturing Engineering* (pp. 197–204). Sestri Levante.
12. Sun, C., Tian, X., Wang, L., Liu, Y., Wirth, C. M., Günster, J., Li, D., & Jin, Z. (2017). Effect of particle size gradation on the performance of glass-ceramic 3D printing process. *Ceramics International*, 43(1), 578–584. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.197>
13. Du, W., Ren, X., Chen, Y., Ma, C., Radovic, M., & Pei, Z. (2018). Model guided mixing of ceramic powders with graded particle sizes in binder jetting additive manufacturing. In *ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. 1–9). College Station, TX. <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6651>
14. Du, W., Roa, J., Hong, J., Liu, Y., Pei, Z., & Ma, C. (2021). Binder jetting additive manufacturing: Effect of particle size distribution on density. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 143(9), 091002_1–091002_26. <https://doi.org/10.1115/1.4050306>
15. Suwanprateeb, J., Sanngam, R., & Panyathanmaporn, T. (2010). Influence of raw powder preparation routes on properties of hydroxyapatite fabricated by 3D printing technique. *Materials Science and Engineering C*, 30(4), 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2010.02.014>
16. Irsen, S. H., Leukers, B., Höckling, C., Tille, C., & Seitz, H. (2006). Bioceramic granulates for use in 3D printing: Process engineering aspects. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37(6), 533–537. <https://doi.org/10.1002/mawe.200600033>
17. Gildenhaar, R., Knabe, C., Gomes, C., Linow, U., Houshmand, A., & Berger, G. (2011). Calcium alkaline phosphate scaffolds for bone regeneration 3D-fabricated by additive manufacturing. *Key Engineering Materials*, 493–494, 849–854. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.493-494.849>
18. Ben, Y., Zhang, L., Wei, S., Zhou, T., Li, Z., Yang, H., Wang, Y., Selim, F. A., Wong, C., & Chen, H. (2017). PVB modified spherical granules of β -TCP by spray drying for 3D ceramic printing. *Journal of Alloys and Compounds*, 721, 312–319. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.05.008>
19. Seitz, H., Deisinger, U., Leukers, B., Detsch, R., & Ziegler, G. (2009). Different calcium phosphate granules for 3-D printing of bone tissue engineering scaffolds. *Advanced Engineering Materials*, 11(5), 41–46. <https://doi.org/10.1002/adem.200800334>

20. Cox, S. C., Thornby, J. A., Gibbons, G. J., Williams, M. A., & Mallick, K. K. (2015). 3D printing of porous hydroxyapatite scaffolds intended for use in bone tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering C*, 47, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.11.024>
21. Chumnanklang, R., Panyathanmaporn, T., Sitthiseripratip, K., & Suwanprateeb, J. (2007). 3D printing of hydroxyapatite: Effect of binder concentration in pre-coated particle on part strength. *Materials Science and Engineering C*, 27(4), 914–921. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.11.004>
22. Du, W., Miao, G., Liu, L., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Binder jetting additive manufacturing of ceramics: Feedstock powder preparation by spray freeze granulation. In *ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. 1–6). Erie, PA. <https://doi.org/10.1115/MSEC2019-3001>
23. Du, W., Miao, G., Liu, L., Pei, Z., & Ma, C. (2019). Binder jetting additive manufacturing of ceramics: Comparison of flowability and sinterability between raw and granulated powders. In *ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference* (pp. 1–8). Erie, PA. <https://doi.org/10.1115/MSEC2019-2983>
24. Domiri Ganji, D., Mahboobtosi, M., & Nadalinia Chari, F. (2025). Nonlinear radiation in entropy generation MHD flow of penta-hybrid nanofluids: Effects of variable thermal conductivity, viscous dissipation and nonlinear convection. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 18(2), Article 101524. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2025.101524>
25. Jalili, B., Majidi Zar, P., Liu, D., Ji, C.-H., Jalili, P., Abdelmohimen, M. A. H., & Domiri Ganji, D. (2024). Thermal study of MHD hybrid nanofluids confined between two parallel sheets: Shape factors analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63, Article 105229. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105229>
26. Nakorchevski, A. I. (1980). *Heterogeneous turbulent jets*. Naukova Dumka. [in Ukrainian]
27. Nakorchevski, A. I., & Kazachkov, I. V. (1979). Calculation of the heterogeneous turbulent jet. In *Systems of automation of continuous technological processes* (pp. 68–79). Institute of Cybernetics of NASU. [in Ukrainian]
28. Kazachkov, I. (2025). *Turbulent two-phase jets of mutually immiscible liquids: Mixing and heat transfer*. Cambridge Scholars Publishing.
29. Kazachkov, I. V. (2018). Approaches for mathematical modeling and experimental study of the turbulent flows of mutually immiscible liquids (oil-water). *International Journal of Petroleum and Petrochemical Engineering*, 4(1), 70–81. <https://doi.org/10.20431/2454-7980.0401008>
30. Kazachkov, I. V. (1980). Mathematical modelling of heterogeneous turbulent jets in cylindrical chamber. *Soviet Automatic Control*, 13, 1–6. [in Ukrainian]
31. Nakorchevski, A. I., & Basok, B. I. (2001). *Hydrodynamics and heat transfer in heterogeneous systems and devices of pulsating type*. Naukova Dumka. [in Ukrainian]

The article was received 17.02.2026, received after revision 23.03.2026, accepted 22.04.2026

Казачков Іван Васильович

д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри, Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя

Адреса робоча: 16602, Україна, м. Ніжин, вул. Графська, 2

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9645-563X> **e-mail:** kazachkov.iv@ndu.edu.ua

Нестеренко Олександр Васильович

доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-889X> **e-mail:** aleksandrnesterenkoua@gmail.com

УДК 550.34:620.179

Vasyl Mostovyy¹, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-1893> **e-mail:** vasyi.mostovyy@gmail.com

Anton Korobenko², PhD Student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7099-6535> **e-mail:** anton.korobenko.off@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF A DAMPER PENDULUM ON A STEEL CANTILEVER MEMBER OF A SPATIAL STRUCTURE

Abstract. *The paper presents the results of an experimental study on the dynamic characteristics of a steel cantilever element in a spatial structure, using passive seismoacoustic monitoring methods. The purpose of the study was to determine the spectral characteristics of the object and assess the effectiveness of the pendulum vibration damper, as well as to conduct a comparative analysis of the damping properties of the structure under different operating modes. The study's relevance stems from the need to increase the reliability of engineering structures by implementing modern methods for monitoring their technical condition.*

Vibrations were recorded using three-dimensional geophones with velosymmetric sensors oriented along three mutually perpendicular axes, which ensured the fixation of the spatial structure of the vibration process. Measurements were carried out under conditions of natural disturbance without the use of artificial influences, which allowed obtaining data close to the real operating conditions of the structure. The monitoring system provided continuous recording, preliminary signal processing and their spectral analysis.

During the study, the natural frequencies and shapes of the structure's vibrations were determined, and its damping characteristics were evaluated in the absence and presence of a pendulum damper. It was found that the use of a damper leads to a decrease in the amplitudes of vibrations and an increase in the level of damping, which confirms its effectiveness. It is shown that spectral characteristics can be considered as an informative indicator of the technical condition of the structure, sensitive to changes in its mechanical properties.

The results obtained confirm the feasibility of using passive seismoacoustic monitoring for the diagnosis of engineering structures. The proposed approach can be used to assess the condition of structures, monitor the effectiveness of vibration damping systems, and detect damage early.

Keywords: *pendulum oscillations, Fourier transform, seismic monitoring, emission signal.*

В.С. Мостовий¹, А.П. Коробенко²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, Україна

ОЦІНКА ВПЛИВУ МАЯТНИКА ГАСИТЕЛЯ НА СТАЛЕВИЙ КОНСОЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ ПРОСТОРОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Анотація. У роботі наведено результати експериментального дослідження динамічних характеристик сталевого консольного елемента просторової конструкції з використанням методів пасивного сейсмоакустичного моніторингу. Метою дослідження було визначення спектральних характеристик об'єкта та оцінювання ефективності маятникового гасника коливань, а також порівняльний аналіз демпфувальних властивостей конструкції за різних режимів її роботи. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення надійності інженерних споруд шляхом впровадження сучасних методів контролю їх технічного стану.

Реєстрація коливань здійснювалася за допомогою тривимірних геофонів із велосиметричними датчиками, орієнтованими вздовж трьох взаємно перпендикулярних осей, що забезпечило фіксацію просторової структури коливального процесу. Вимірювання проводилися в умовах природного збурення без застосування штучних впливів, що дозволило отримати дані, наближені до реальних умов експлуатації конструкції. Система моніторингу забезпечувала безперервний запис, попередню обробку сигналів та їх спектральний аналіз.

У ході дослідження визначено власні частоти та форми коливань конструкції, а також оцінено її демпфувальні характеристики за відсутності та за наявності маятникового гасника. Встановлено, що використання гасника призводить до зниження амплітуд коливань і підвищення рівня демпфування, що підтверджує його ефективність. Показано, що спектральні характеристики можуть розглядатися як інформативний індикатор технічного стану конструкції, чутливий до змін її механічних властивостей.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування пасивного сейсмоакустичного моніторингу для діагностики інженерних споруд. Запропонований підхід може бути використаний для оцінювання стану конструкцій, контролю ефективності систем гасіння коливань і раннього виявлення пошкоджень.

Ключові слова: коливання маятника, перетворення Фур'є, сейсмічний моніторинг, емісійний сигнал.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.206-218>

Вступ

Реєстрація коливань сталевого консольного елемента просторової конструкції проводилася з метою отримання спектральних характеристик досліджуваного об'єкта та аналізу можливостей системи гасіння коливань, яка була встановлена на об'єкті. Для реєстрації коливань використовувалися тривимірні геофони з датчиками (велосиметри СК-1П), орієнтованими за трьома взаємно перпендикулярними осями (одна з яких вертикальна). Спектральні характеристики датчиків являють собою одномодальні криві

з екстремумом у точці $f = 1$ Гц. Датчики були розміщені на горизонтальній поверхні, на відстані два метри нижче маятника гасителя. Вони є складовою частиною інтерфейсу автоматизованої системи сейсмічного моніторингу реєстрації та обробки досліджуваного процесу. Ця система дозволяє коригувати спектральні характеристики датчиків аж до рівномірних у вибраному діапазоні частот. Мета дослідження – оцінка демпфуючих властивостей маятника гасителя. Необхідно зазначити, що спектр досліджуваного об'єкта – це його стійка характеристика, яка змінюється при зміні механічних параметрів конструкції і може використовуватися для виявлення «вікових» змін конструкції протягом її терміну експлуатації. Можна вважати, що фіксовані спектральні характеристики конструкції надалі можуть використовуватися як задані стартові значення для виявлення моменту її «старіння», які можуть змінюватися в процесі сейсмічного моніторингу в разі накопичення локальних пошкоджень, наприклад, появи мікро- або макротріщин.

Цілі та завдання дослідження

Метою даного дослідження було визначення, в результаті інструментальних спостережень, спектральних характеристик консольного елемента. Визначення демпфуючих характеристик власне консольного елемента в режимі відсутності гасителя коливань. І визначення демпфуючих характеристик власне консольного елемента в режимі працюючого маятника гасителя коливань. Передбачалося здійснити пасивний сейсмічний моніторинг, коли коливання консольного елемента викликані природними факторами (вітер, техногенні, антропогенні шуми, мікросейсмічний фон).

Методи

Під час проведення сейсмічного моніторингу в якості чутливих елементів системи реєстрації та обробки даних були використані трикомпонентні велосиметри СК-1П, які являють собою 3 взаємно перпендикулярно орієнтовані датчики з вузькою діаграмою спрямованості. Спектральна характеристика горизонтально орієнтованих датчиків приладу – це одномодальна крива з максимумом у точці 1 Гц.

Датчики були встановлені в конструкції консольного елемента на діафрагмі, розташованій на два метри нижче маятника-гасителя. Дані з датчиків надходили по екранованих кабелях зв'язку на фізичний інтерфейс системи реєстрації спостережень та їх обробки. Використовувалися датчики з горизонтальною діаграмою спрямованості, оскільки вони представляли найбільший інтерес (амплітуда швидкості поперечних коливань консольного елемента перевершувала поздовжні на порядок, як це було встановлено в першому дослідженні), тому z-компонента надалі не реєструвалася.

При аналого-цифровому перетворенні використовувався інтервал квантування 0,01 секунди, що еквівалентно можливості відновлення аналогового сигналу за решітковою функцією до частоти 50 Гц відповідно до теореми Найквіста–Котельнікова [1]. Що стосується нижньої граничної частоти, то вона визначається нижньою граничною частотою сенсора, яка на рівні 0,1 дорівнює 0,05 Гц. Попередня система обробки даних здійснює

трансформацію передавальної функції сенсора та каналу зв'язку до рівномірної в заданому діапазоні частот. Щоправда, при цьому збільшується відношення перешкода-сигнал в області корекції [2].

Для обробки коливань використовувалося математичне забезпечення, що дозволяє визначати спектральні характеристики як всього запису, так і його фрагментів, визначати зсуви фаз на різних датчиках за максимумом кореляційної функції, оцінювати параметри огинаючої експоненти фрагментів запису.

У будь-якому дослідженні поряд з корисною інформацією завжди присутня перешкода. Вплив перешкоди на досліджуваний матеріал не дає можливості досліднику отримати корисну інформацію у зручному для нього вигляді. У даній роботі застосовувалися математичні моделі боротьби з перешкодою в системах сейсмічного моніторингу, враховуючи особливості подання та обробки інформації в сейсмічному та нижній частині акустичного діапазоні частот.

Частотний фільтр виділення. Оскільки операція згортки в часовій області відповідає операції множення спектрів Фур'є згорткових функцій [3], то згортка сигналу з ядром, що має потрібний для фільтрації сигналу спектр, є простим і легко реалізованим у часовій області способом фільтрації. При обробці польових спостережень з високим рівнем шуму автори використовували процедуру згортки сигналу $y(t)$ з ядром $K(t)$ виду гауссового розподілу ймовірностей:

$$K(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-(t)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (1)$$

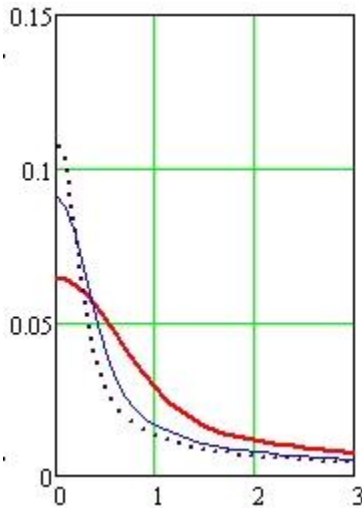


Рис. 1. Модуль спектра Фур'є перетворення ядра (1). Мінімальне значення параметра σ у потовщеної кривої, а максимальне – у кривої у вигляді точок

Модуль спектра Фур'є перетворення ядра (1) має вигляд, наведений на рисунку 1. Перетворення Фур'є від (1) при $\sigma = 1$ має вигляд:

$$F(\omega) = \exp\left(\frac{-\omega^2}{2}\right). \quad (2)$$

Враховуючи теорему подібності [4] спектр Фур'є для (1) буде:

$$F(\omega) = \sigma \exp\left(\frac{-\omega^2 \cdot \sigma^2}{2}\right). \quad (3)$$

З (3) видно, що полоса фільтру регулюється величиною параметра σ . Це видно і з рисунка 1.

Процедура фільтрації полягає у вирахуванні інтеграла згортки для фільтрованого сигналу $Y(t)$, де інтервал $[0, T]$ – це довжина фрагмента зареєстрованих даних:

$$Y(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^T y(\tau) \exp\left(\frac{-(t-\tau)^2}{2\sigma^2}\right) d\tau. \quad (4)$$

Під час польових спостережень широкосмугова апаратура зареєструвала дві горизонтальні складові власних коливань об'єкта дослідження у поєднанні з адитивним шумом, пов'язаним із численними антропогенними та природними джерелами. Об'єкт дослідження – це споруда, розміри якої такі, що її власні коливання лежать у сейсмічній області (менше одного Гц), і об'єкт цілком може моделювати поведінку геологічного розлому. На рисунках 2 і 3 представлені фрагменти цих записів. Метою експерименту було визначити власні частоти коливань та демпферні властивості об'єкта на цих частотах.

Для оцінки демпфуючих характеристик об'єкта було проведено активний експеримент, коли збуджувальним вхідним сигналом був поданий короткий імпульс, який можна було моделювати функцією.

Процедура придушення низькочастотних перешкод. Наведемо ще один важливий тип фільтрації, пов'язаний із придушенням низькочастотних перешкод. Така процедура попередньої обробки може бути актуальною в цілому ряді випадків. Наприклад, у роботі [5] зазначається, що сейсмічні широкосмугові датчики чутливі до магнітного поля. Магнітні бурі та штучні збурення магнітного поля можуть спричинити появу істотного низькочастотного шуму під час реєстрації сейсмічних даних. Показано, що варіації в магнітному полі безпосередньо впливають на величину прискорення в сейсмічних датчиках. Діапазон, в якому перешкода є істотною, знаходиться в межах періодів від 60 до 1200 секунд. Це пов'язано з тим, що в пружинах, які є невід'ємною частиною конструкції датчиків, наводиться ЕРС, що і є причиною спотворень у даних вимірювань. Ефект не є істотним для горизонтальної складової, але при реєстрації вертикальної складової він є істотним.

Перший етап дослідження – побудова оптимальних оцінок лінійного оператора зв'язку між перешкодою, спричиненою низькочастотними варіаціями магнітного поля, та випадковою перешкодою, на тлі якої сейсмографи реєструють сигнали. Висувається гіпотеза щодо такої моделі, що пов'язує магнітне збурення $z(t)$ з сейсмічним фоном $y(t)$:

$$y(t - \theta) = \int_{t-T}^t z(\tau) h(t - \tau) d\tau + n(t). \quad (5)$$

Тут $h(t)$ – стаціонарний лінійний оператор магнітного збурення $z(t)$ та сейсмічного фону $y(t)$ – є фізично здійсненою функцією, відмінною від нуля

лише на інтервалі довжиною T . Передбачається залежність оператора $h(t)$, довжини T , транспортної затримки θ від координат, в яких реєструються функції $y(t)$ та $z(t)$. Адитивна перешкода $n(t)$ у загальному випадку також залежить від точки, в якій реєструється прогностичний параметр $y(t)$.

Задача полягає у визначенні оптимальної оцінки оператора $\hat{h}(t)$, довжини інтервалу носія цієї функції $\hat{T}$ та затримки $\hat{\theta}$ за попередніми даними процесів $y(t)$ та $z(t)$ при заданих статистичних властивостях нормальної перешкоди $n(t)$.

Як критерій оптимальності (у разі відсутності будь-яких уявлень про T , θ та $h(t)$) розглядається критерій максимуму функції правдоподібності.

Оскільки оператор $h(t)$ передбачається фізично здійсненою функцією, відмінною від нуля на інтервалі $(0, T)$, то оцінку $\hat{h}(t)$ природно шукати у вигляді

$$\hat{h}(t) = \sum_{i=1}^n \hat{h}_i \varphi_i(t) \chi(t; \hat{T}) = \sum_{i=1}^n \hat{\vec{h}}^T, \vec{\varphi}_i(t) \chi(t; \hat{T}), \quad (6)$$

де $\chi(t; \hat{T})$ характерна функція інтервалу

$$\chi(t; \hat{T}) = \begin{cases} 1, & t \in (0, \hat{T}); \\ 0, & t \notin (0, \hat{T}). \end{cases}$$

$\vec{\hat{h}} = \{ \hat{h}_i^T \}$ – транспонований вектор оцінок коефіцієнтів апроксимуючого ряду при $i = \overline{1, n}$ (n – кількість функцій з ортонормованого базису), а оцінка оператора $\hat{h}(t)$ апроксимується n членами розкладу в ряд на інтервалі $(0, T)$ за ортонормованим базисом $\vec{\varphi}(t) = \{ \varphi_i(t) \}$.

Широкий клас модельованих низькочастотних перешкод $n(t)$ може бути апроксимований стаціонарним, експоненціально корельованим процесом. Ширина смуги в спектральній області та весь процес визначаються двома параметрами. Кореляційна функція такого процесу має вигляд:

$$K(\tau) = \sigma^2 \exp\{-\alpha|\tau|\}. \quad (7)$$

Тут параметр σ^2 визначає потужність шуму, а параметр α – ширину спектра. На рисунку 4 представлена кореляційна функція процесу, а на рисунку 6 – його модуль спектра. Параметр α визначає і ширину спектра.

Функціонал щільності ймовірності нормального експоненціального корельованого стаціонарного шуму має вигляд [6].

$$F[n(t)] = l \exp\left[-\frac{n_i^2}{2\sigma^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{4\alpha\sigma^2} \int_{\mathfrak{A}} \left[\frac{dn(t)}{dt} + \alpha n(t)\right]^2 dt\right] \quad (8)$$

Тут l – певна константа; n – значення шуму в першій точці інтервалу спостереження; α та σ – параметри, що визначають кореляційну функцію процесу (1).

Для перешкоди з функціоналом щільності ймовірності (8) система рівнянь для оптимальної оцінки вектора параметрів $\vec{\hat{h}}$ матиме вигляд [7]:

$$\left[\psi^0(\theta, T) + \left(\frac{1}{2\alpha} \right) \psi(\theta, T) \right] \vec{h} = \vec{I}^{(0)}(\theta, T) + \vec{I}(\theta, T), \quad (9)$$

де прийняті такі значення:

$$\begin{aligned} I_i^{(0)}(\theta, T) &= y_1 \int_0^T \varphi_i(\tau) z(t + \tau) d\tau \\ \vec{I}^{(0)}(\theta, T) &= \{I_i^{(0)}(\theta, T)\}_{i=\overline{1, n}} \\ I_i(\theta, T) &= \int_{\mathfrak{Z}} [y'_t(t) + \alpha y(t)] \cdot \left[\left(\int_{t-T}^t \varphi_i(t - \tau) z(\tau + \theta) d\tau \right) + \alpha \int_{t-T}^t \varphi_i(t - \tau) z(t + \tau) d\tau \right]; \\ \vec{I}(\theta, T) &= \{I_i(\theta, T)\} \\ \psi_{ij}^{(0)}(\theta, T) &= \int_0^T \varphi_i(t - \tau) z(\tau + \theta) d\tau \cdot \int_0^T \varphi_j(t - \tau) z(\tau + \theta) d\tau, \\ \psi^{(0)}(\theta, T) &= \{\psi_{ij}^{(0)}(\theta, T)\}_{i, j=\overline{1, n}}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\psi_{ij}(\theta, T) = \int_{\mathfrak{Z}} \int_{t-T}^t \varphi_j(t - \tau) z(\tau + \theta) d\tau dt + \int_{\mathfrak{Z}} \alpha \int_{t-T}^t \varphi_i(t - \tau) z(\tau + \theta) d\tau dt.$$

Як було відмічено, рішення системи рівнянь (9) дасть умовно оптимальну оцінку вектора параметрів $\hat{\vec{h}}$, яка залежить від значень θ та T .

Проведення дослідження

Дослідження проводилося у два етапи, розділені в часі. На першому етапі було отримано попередні оцінки динамічного діапазону реєстрованих коливань, спектральні характеристики під час пасивного сейсмічного моніторингу, а також обрано спосіб формування сигналу збудження для активної фази дослідження. Були визначені співвідношення між вертикальною та горизонтальною складовими коливань (по суті, між поздовжніми та поперечними коливаннями споруди). На другому етапі були використані ці результати, були введені коригувальні ланцюги в датчики.

Пасивний моніторинг. Математичні моделі. Обробка спостережень

Для вирішення поставленого завдання проведено пасивний сейсмічний моніторинг об'єкта з джерелами емісійних сигналів, параметри яких підлягають визначенню і є характеристикою структури [8].

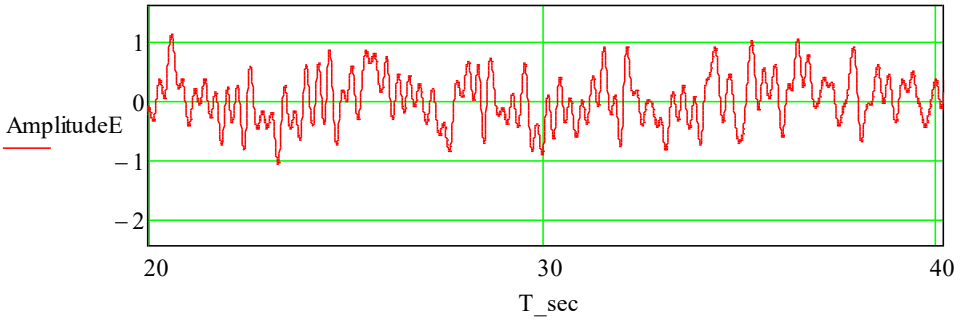


Рис. 2. Фрагмент відфільтрованого запису (тривалістю 20 сек, в інтервалі від 20 сек до 40 сек) реакції споруди на природний фон при фіксованому маятнику. Запис зроблено датчиком, орієнтованим у південному напрямку. По осі абсцис відкладено час у секундах. По осі ординат з точністю до множника відкладено функцію швидкості коливання споруди в м/с.

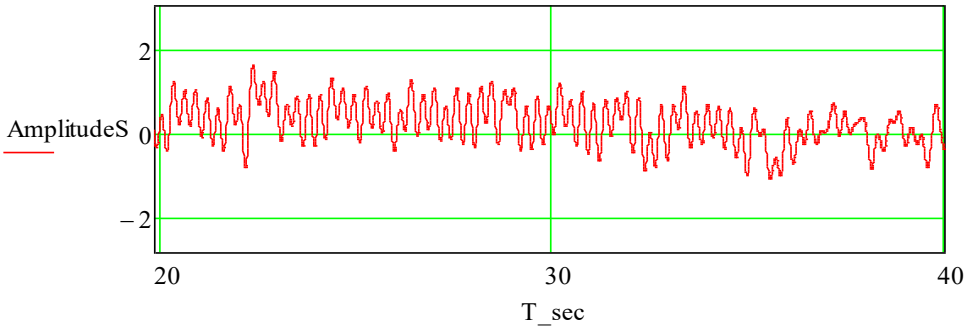


Рис. 3. Фрагмент відфільтрованого запису (тривалістю 20 с, в інтервалі від 20 с до 40 с) реакції споруди на природний фон при фіксованому маятнику. Запис зроблено датчиком, орієнтованим у східному напрямку. По осі абсцис відкладено час у секундах. По осі ординат з точністю до множника відкладено функцію швидкості коливання споруди в м/с

На рисунках 2 і 3 наведено фрагменти відфільтрованого двокomпонентного запису (тривалістю 20 с, в інтервалі від 20 с до 40 с) реакції споруди на природний фон, математична модель якого представлялася як суперпозиція реакцій системи $h_H(t)$ на пуассонівський потік t_k імпульсів $\delta(t - t_k)$ різної амплітуди Θ_k при фіксованому маятнику.

$$y(t) = h_H(t) * \sum_{k=1}^q \Theta_k \cdot \delta(t - t_k) + n(t), \quad (11)$$

тут символом $*$ показаний оператор згортки

$$h(t) * x(t) = \int_0^t h(t - \tau) \cdot x(\tau) \cdot d\tau, \quad (12)$$

q – це кількість імпульсів, які попали в область спостереження, а $n(t)$ – це перешкоди від інших джерел.

$$|Y(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Omega} K(t) \cdot \exp\{-i\omega t\} \cdot dt, \quad (13)$$

де Ω – це область спостереження в нашому випадку Ω дорівнює 60 секундам, а кореляційна функція $K(t)$ визначається виразом

$$K(t) = \frac{1}{\Omega} \int_0^{\Omega} y(t + \tau) \cdot y(\tau) \cdot d\tau, \quad \tau \in (-\Omega, \Omega). \quad (14)$$

При фіксованій інтенсивності потоку імпульсів і кінцевій дисперсії флуктуючих коефіцієнтів θ_k модуль спектра реакції системи з точністю до постійного множника збігається з модулем спектра процесу $y(t)$ [7].

Таким чином, задача оцінки модуля спектра споруди зводилася до оцінки спектра випадкового процесу $y(t)$.

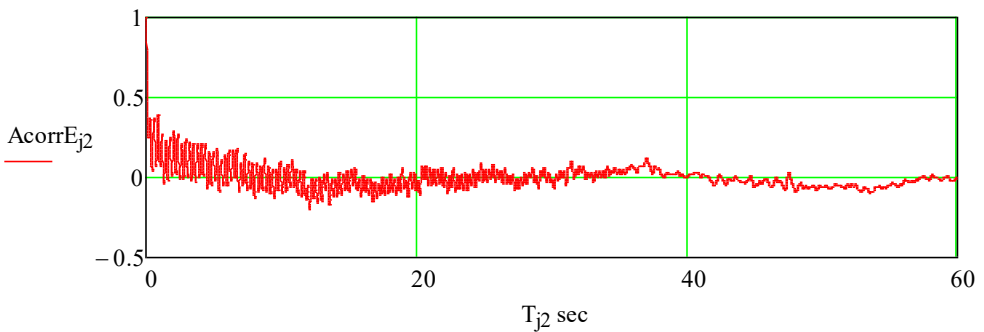


Рис. 4. Кореляційна функція випадкового процесу, зареєстрованого датчиком, орієнтованим у східному напрямку. По осі абсцис відкладено час у секундах. По осі ординат відкладено коефіцієнт кореляції

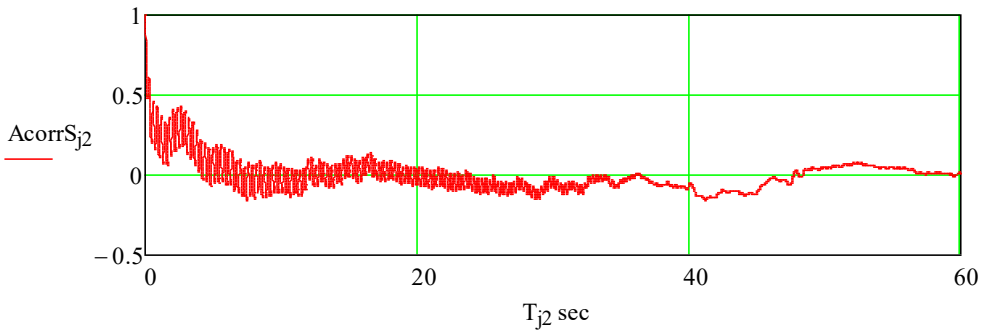


Рис. 5. Кореляційна функція випадкового процесу, зареєстрованого датчиком, орієнтованим у південному напрямку. По осі абсцис відкладено час у секундах. По осі ординат відкладено коефіцієнт кореляції

На рисунку 7 наведено модуль спектра процесу $y(t)$, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, у діапазоні від 0 до 6 Гц.

З огляду на геометричні розміри конструкції та консольного елемента, можна зробити висновок, що перша мода частоти (у нижній частині спектра) належить до власних частот усієї споруди в цілому. Власні частоти безпосередньо консольного елемента слід шукати в діапазоні від 1 Гц до 5 Гц.

З рисунка 7 видно, що в даному частотному діапазоні виділяється мода з частотою $f = 3,43$ Гц. З цього рисунка видно, що домінуюча частина енергії коливань зосереджена в околиці частоти $f = 3,43$ Гц, оцінка її відносної величини дорівнює 2596,8 у східному напрямку, а в околиці частоти $f = 3,43$ Гц, оцінка її відносної величини дорівнює 6610,2 у південному напрямку.

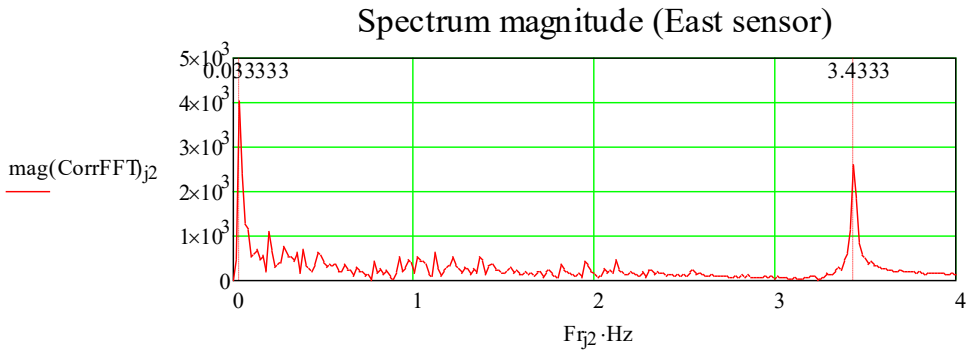


Рис. 6. Амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, що реєструється датчиком, орієнтованим у східному напрямку, яка визначалася з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, у відносних одиницях, у діапазоні частот від 0 до 6 Гц при фіксованому маятнику. На осі абсцис наведено частоту в герцах. На осі ординат представлено амплітуду спектра в умовних одиницях

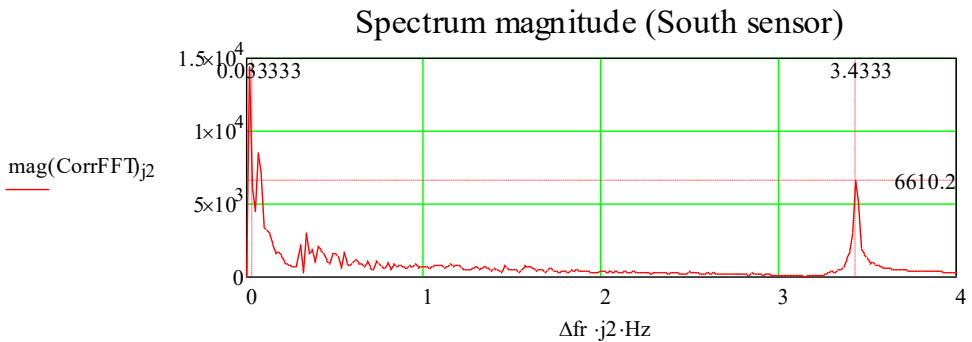


Рис. 7. Амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, що реєструється датчиком, орієнтованим у південному напрямку, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, у відносних одиницях, у діапазоні частот від 0 до 6 Гц при фіксованому маятнику. На осі абсцис подано частоту в герцах. На осі ординат представлено амплітуду спектра в умовних одиницях

На рисунку 8 представлена амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$ в діапазоні частот від 3 до 4 Гц при фіксованому маятнику.

На рисунку 10 показана амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, у діапазоні частот від 3 до 4 Гц при вільно коливному маятнику.

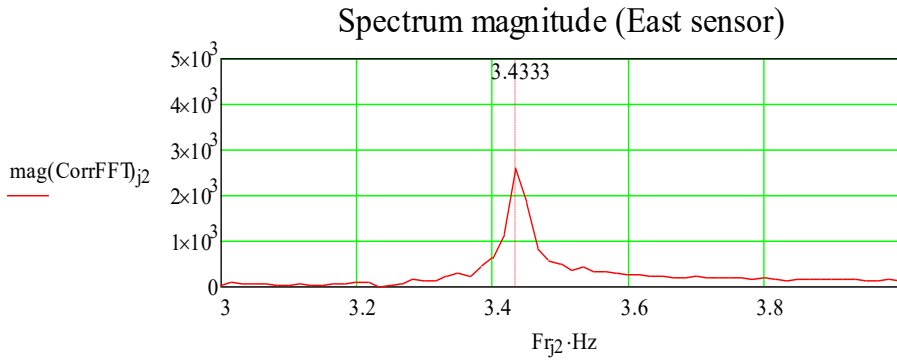


Рис. 8. Амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, що реєструється датчиком, орієнтованим у східному напрямку, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, в умовних одиницях, у діапазоні частот від 3 до 4 Гц при фіксованому маятнику. На осі абсцис вказано частоту в герцах. На осі ординат представлено амплітуду спектра в умовних одиницях

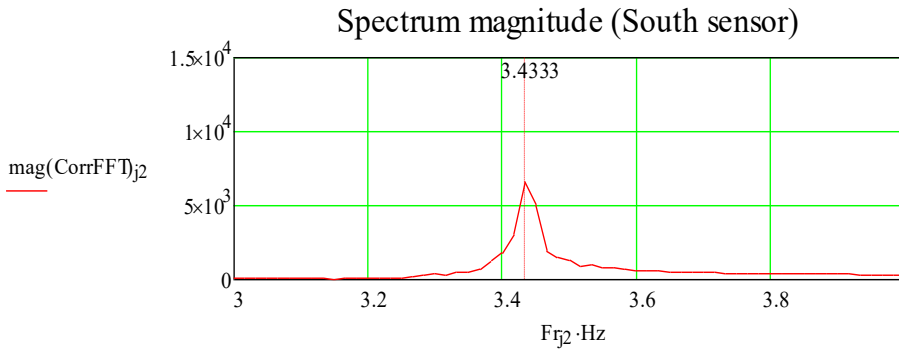


Рис. 9. Амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, що реєструється датчиком, орієнтованим у південному напрямку, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, в умовних одиницях, у діапазоні частот від 3 до 4 Гц при фіксованому маятнику. На осі абсцис подано частоту в герцах. На осі ординат представлено амплітуду спектра в умовних одиницях

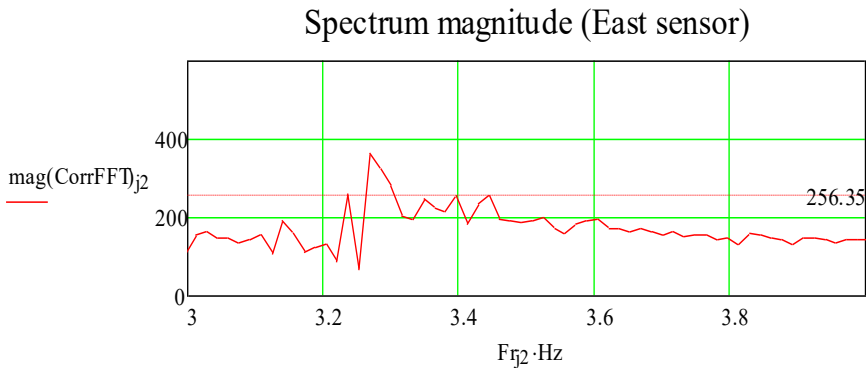


Рис. 10. Амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, що реєструється датчиком, орієнтованим у східному напрямку, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, в умовних одиницях, у діапазоні частот від 3 до 4 Гц при вільно коливному маятнику. На осі абсцис подано частоту в герцах. На осі ординат представлено амплітуду спектра в умовних одиницях

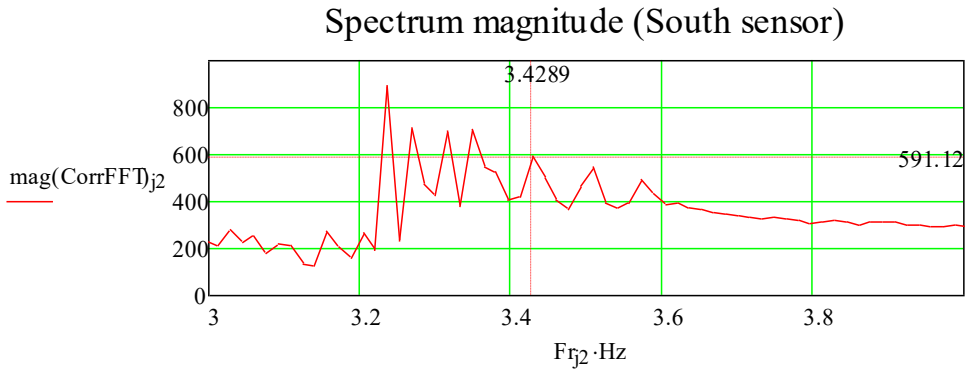


Рис. 11. Амплітуда модуля спектра процесу $y(t)$, що реєструється датчиком, орієнтованим у південному напрямку, який визначався з перетворення Фур'є кореляційної функції $K(t)$, в умовних одиницях, у діапазоні частот від 3 до 4 Гц при фіксованому маятнику. На осі абсцис подано частоту в герцах. На осі ординат представлено амплітуду спектра в умовних одиницях

З рисунків 8 і 10 видно, що на резонансній частоті консольного елемента $f = 3,43$ Гц амплітуда модуля спектра знизилася з 2596,8 у відносних одиницях при фіксованому маятнику до 257,27 у відносних одиницях при маятнику, що працює у східному напрямку. З рисунків 9 і 11 видно, що на резонансній частоті консольного елемента $f = 3,43$ Гц амплітуда модуля спектра знизилася з 6610,2 у відносних одиницях при фіксованому маятнику до 591,12 у відносних одиницях при працюючому маятнику в південному напрямку. Таким чином, видно, що працюючий маятник зменшив коливання консольного елемента, знизивши амплітуду модуля спектра на порядок.

Висновки

За результатами сейсмічного моніторингу та обробки отриманих даних можна зробити такі висновки:

У діапазоні спектра коливань консольного елемента присутня яскраво виражена одна основна компонента на частоті $f = 3,43$ Гц, з амплітудами 2596,8 відносних одиниць у східному напрямку та $f = 3,43$ Гц, з амплітудами 6610,2 відносних одиниць у південному напрямку.

Включений маятниковий гаситель знижує амплітуду модуля спектра на основній резонансній частоті $f = 3,43$ Гц на порядок. У проведеному дослідженні у східному напрямку амплітуда модуля спектра на основній резонансній частоті $f = 3,43$ Гц знизилася з 2596,8 відносних одиниць при фіксованому маятнику до 256,35 відносних одиниць при працюючому маятнику. І в південному напрямку амплітуда модуля спектра на основній резонансній частоті $f = 3,43$ Гц знизилася з 6610,2 відносних одиниць при фіксованому маятнику до 591,12 відносних одиниць при працюючому маятнику.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Korn, G. A., Korn, T. M. (1968). *Mathematical Handbook for Scientists and Engineers*. McGraw-Hill.
2. Rao, S. S. (2017). *Mechanical Vibrations* (6-th edition). Pearson.
3. Kolmogorov, A., Fomin, S. *Introductory Real Analysis*. Dover Publications.
4. Alpay, D. (2015). *Complex Analysis Problem Book*. Birkhäuser.
5. Forbriger, T. (2007). Reducing magnetic field induced noise in broad-band seismic recordings. *Geophys. J. Int.*, 240–258.
6. Kay, Steven M. (1998). *Fundamentals of Statistical Signal Processing, Volume II. Detection Theory* Prentice Hall.
7. Mostovyi, V. S. (1996). *Modeli vyivlennia ta identyfikatsii syhnaliv u systemakh monitorynhu heofizychnykh poliv* [Models for detection and identification of signals in geophysical field monitoring systems] (Candidate's dissertation in Physical and Mathematical Sciences, Specialty 01.04.12). Kyiv, Ukraine. [in Ukrainian]
8. Cherevko, I., Kril, T., Mostovyi, V., & Shcherbyna, S. (2025). *Monitorynh stanu budivel kulturnoi spadshchyny v umovakh viiskovykh dii* [Monitoring of the condition of cultural heritage buildings under conditions of military actions]. *International Journal of Conservation Science*, 16(4), 1755–1774. [in Ukrainian]

Стаття надійшла до редакції 12.02.2026, надійшла після рецензування 23.04.2026, прийнята 23.04.2026

The article was received 12.02.2026, received after revision 23.04.2026, accepted 23.04.2026

Мостовий Василь Сергійович

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1759-1893> **e-mail:** vasyi.mostovyy@gmail.com

Коробенко Антон Петрович

аспірант, Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Адреса робоча: 03022, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 4-Д

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-7099-6535> **e-mail:** anton.korobenko.off@gmail.com

УДК 004.91

Borys Horlynskyi^{1,2}, Candidate of technical sciences, Principal research scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9993-2427> **e-mail:** vjzgoxnf@gmail.com

Dmytro Bondarenko², Head of Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7815-6027> **e-mail:** dimbond@ukr.net

Nataliia Lysenko², Head of Division
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-9935-7646> **e-mail:** natalka.lsnk@ukr.net

Tetiana Maslennikova², Candidate of pedagogical sciences, Associate professor, Deputy Head of Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6287-0878> **e-mail:** tmaslennikova@gmail.com

Pavlo Kurbet¹, Ph.D., Junior researcher scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0612-3859> **e-mail:** tovsba@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of the NASU, Kyiv, Ukraine

²State Scientific and Research Institute of Cybersecurity Technologies and Information Protection, Kyiv, Ukraine

RESEARCH THE PROBLEM OF USING ELECTRONIC SIGNATURE TO PROTECT INFORMATION WITH LIMITED ASSESS

Abstract. *The rapid development of electronic document management systems in the world creates real prospects for a complete abandonment of the use of paper documents.*

Currently, electronic document management systems are successfully operating in Ukraine, in which open information is processed. This is facilitated by the presence of a valid legislative framework. At the same time, the development of electronic document management systems containing information with limited access is hampered by the incompleteness of the legislative basis.

The purpose of the article is to present the main results of research work aimed at identifying problematic issues regarding the standardization of the use of electronic signatures to protect electronic documents containing information with limited access, processed in information and communication systems.

In order to eliminate fragmentation and complete the development of the legislative framework regulating electronic document flow containing information with limited access, it is proposed:

1) to develop a draft Procedure for the provision and use of electronic identification services and electronic trust services provided using information and communication systems when processing official information and information constituting a state secret, to approve it by departmental order and to coordinate it with the Ministry of Justice of Ukraine);

2) create (for several interested state bodies) experimental sections of the ICS for processing electronic documents containing official and secret information, and, in the process of comprehensive testing, investigate their operability, challenges in developing security profiles, possibilities of obtaining certificates, etc.

3) amend the Law of Ukraine "On Electronic Identification and Electronic Trust Services", as well as a number of regulatory legal acts regulating the handling of paper secret documents, providing for the concept of "electronic secret document" in them.

Keywords: legislative framework, trust services, qualified electronic signature, qualified electronic seal, qualified certificate, qualified electronic time stamp, electronic document flow containing information with limited access.

**Б.В. Горлинський^{1,2}, Д.М. Бондаренко², Н.В. Лисенко²,
Т.А. Масленникова², П.М. Курбет¹**

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМАТИКИ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПІДПISУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ З ОБМЕЖЕНИМ ДОСТУПОМ

***Анотація.** Бурхливий розвиток систем електронного документообігу у світі створює реальні перспективи повної відмови від використання паперових документів.*

На поточний час в Україні успішно функціонують системи електронного документообігу, в яких обробляється відкрита інформація. Цьому сприяє наявність чинної законодавчої бази. Разом з тим, розвиток систем електронного документообігу, що містить інформацію з обмеженим доступом, стримується незавершеністю законодавчих підстав.

Метою статті є викладення основних результатів науково-дослідної роботи, спрямованої на визначення проблемних питань щодо унормування використання електронного підпису для захисту електронних документів, які містять інформацію з обмеженим доступом, що обробляються в інформаційно-комунікаційних системах.

Для усунення фрагментарності та завершення розбудови законодавчої бази, яка регламентує електронний документообіг, що містить інформацію з обмеженим доступом, запропоновано:

1) розробити проєкт Порядку надання та використання послуг електронної ідентифікації та електронних довірчих послуг, які надаються за допомогою інформаційно-комунікаційних систем при обробленні службової інформації та інформації, що становить державну таємницю, затвердити його наказом Адміністрації Держспецзв'язку та погодити з Міністерством юстиції України;

2) створити (декільком зацікавленим державним органам) дослідні ділянки ІКС для оброблення електронних документів, що містять службову та секретну інформацію, та, у процесі всебічних випробувань, дослідити їх роботоспроможність, виклики при розробленні профілів безпеки, можливості отримання сертифікатів тощо;

3) внести зміни до Закону України “Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги”, а також низки нормативно-правових актів, що регламентують поводження з паперовими секретними документами, передбачивши в них поняття “електронний секретний документ”.

Ключові слова: законодавча база, довірчі послуги, кваліфікований електронний підпис, кваліфікована електронна печатка, кваліфікований сертифікат, кваліфікована електронна позначка часу, електронний документообіг, що містить інформацію з обмеженим доступом.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.219-229>

Вступ

На сучасному етапі розвитку світових комп'ютерних технологій сформувалася стійка тенденція заміни паперового документообігу електронним. Це створює цілком реальні перспективи повної відмови від паперових документів (у тому числі, і у сфері повсякденної діяльності державних органів).

Наразі, процеси цифровізації документообігу не завжди зменшують трудовитрати чи вивільняють переконливу кількість персоналу, але високі темпи розвитку цієї сфери зміцнюють впевненість у тому, що, у найближчій перспективі, ця передова технологія буде використовуватися повсюдно і, у кінцевому підсумку, забезпечить оптимізацію процесів управління, зменшення трудовитрат та кількості зайнятого персоналу, а також економію витрат на доставку і збереження електронних документів.

У той же час, система секретного документообігу, наразі, залишається паперовою.

Незважаючи на багаторічну відпрацьованість та надійність системи паперового секретного документообігу, вона морально та технічно застаріла і, загалом, потребує кардинального осучаснення шляхом автоматизації процесів створення, затвердження, доставки та зберігання документів.

Стримувальним фактором, який, наразі, впливає на розвиток системи секретного документообігу, є відсутність законодавчої бази, що не дає можливості реалізувати відповідні інформаційно-комунікаційні системи (ІКС). Зокрема, чинним законодавством не врегульовано питання щодо використання, під час поводження з інформацією з обмеженим доступом, електронного підпису (чи електронної печатки).

Таким чином, на поточний час відсутність законодавчої бази щодо регламентації електронного секретного документообігу становить суттєву проблему, яка потребує свого вирішення.

Зважаючи на це, активізація пошуку шляхів вирішення проблеми створення законодавчої бази, яка б унормувала процеси електронного секретного документообігу, що містить інформацію з обмеженим доступом, є актуальним та своєчасним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На поточний час напрацьований великий обсяг законодавчих актів, які регулюють електронний документообіг. Зокрема, у Законі України [1] наводиться перелік чинної законодавчої бази про електронні документи та електронний документообіг, а також встановлюються правові засади створення, використання, передачі та зберігання електронних документів, які надають їм юридичну силу ідентичну з паперовими.

Важливим кроком у цифровізації держави, яким, загалом, завершується створення законодавчих підстав щодо підтримки електронного документообігу, що містить відкриту інформацію, є Закон України [2]. Цим Законом України визначаються правові та організаційні засади надання електронних довірчих послуг, права та обов'язки суб'єктів правових відносин у сфері електронних довірчих послуг, порядок здійснення державного нагляду за дотриманням вимог законодавства у сфері електронних довірчих послуг, а також правові та організаційні засади здійснення електронної ідентифікації.

Постановою Кабінету Міністрів України [3] затверджено порядок (процедуру) авторизації з безпеки і порядок розроблення та затвердження профілів безпеки (визначають механізми розроблення та затвердження базових, галузевих та цільових профілів безпеки) інформаційних, електронних комунікаційних, ІКС, технологічних систем.

Наказом Адміністрації Держспецзв'язку [4] (опубліковано на офіційному веб-сайті) оприлюднено базовий профіль безпеки інформації для ІКС, де обробляється відкрита та службова інформація, з урахуванням якого повинні розроблятися галузеві цільові профілі безпеки інформації (базовий профіль безпеки секретної інформації надається у встановленому порядку).

Постановою Кабінету Міністрів [5] затверджено Порядок функціонування Національної електронної комунікаційної мережі (НЕКМ), який, у свою чергу, унормовує функціонування мереж та систем спеціального зв'язку, призначених для обміну інформацією, що становить державну таємницю у межах території України між різними типами користувачів.

Формулювання мети статті. Метою статті є викладення основних результатів науково-дослідної роботи, виконаної Державним науково-дослідним інститутом технологій кібербезпеки та захисту інформації, спрямованої на визначення проблемних питань щодо унормування використання електронного підпису для захисту електронних документів, які містять інформацію з обмеженим доступом, що обробляються в інформаційно-комунікаційних системах.

Виклад основного матеріалу дослідження

Носіями інформації при безпаперовому діловодстві являються електронні документи. Законом України [1] це поняття визначено наступним чином: електронний документ – документ, інформація в якому зафіксована у вигляді електронних даних, включаючи обов'язкові реквізити документа. При цьому, електронний документ може бути створений, переданий, збережений і перетворений електронними засобами у візуальну форму.

Однією із основних проблем при створенні електронного документа є ідентифікація автора. У якості основного засобу ідентифікації автора електронного документа використовується електронний підпис (електронні дані, що додаються до інших електронних даних або логічно з ними пов'язуються і використовуються підписувачем як підпис).

Важливою проблемою при створенні електронного документа є забезпечення довіри до того, що це оригінал документа, який несанкціоновано не змінений після накладання електронного підпису. Ключовою ознакою, що характеризує довіру до електронного документа є його цілісність. Саме ця ознака гарантує, що електронний документ не було змінено після моменту створення (наприклад, у процесі доставки чи зберігання). Іншими словами, можна сказати, що цілісність відіграє роль певного “цифрового замка”, який виходить з ладу при несанкціонованому поводженні з електронним документом.

У загальному випадку, електронний підпис, окрім ідентифікації автора електронного документа, слугує також і засобом підтвердження його цілісності.

Крім того, для забезпечення достовірності походження пов'язаних електронних даних, зокрема, для засвідчення електронних підписів підписувачів на електронних документах, або для засвідчення відповідності копій документів оригіналам та виявлення порушення цілісності може використовуватися також електронна печатка (електронні дані, що додаються до інших електронних даних або логічно з ними пов'язуються).

Таким чином, створення електронного документа завершується накладанням електронного підпису та/або електронної печатки (фізично це відбувається шляхом доповнення обсягу електронного документа даними електронного підпису та електронної печатки).

Законом України [2] конкретизовано поняття “електронний підпис”, зокрема, визначено два його різновиди, які відрізняються рівнями безпеки та довіри: удосконалений електронний підпис (УЕП), що базується на кваліфікованому сертифікаті електронного підпису, та кваліфікований електронний підпис (КЕП).

Удосконалений електронний підпис, що базується на кваліфікованому сертифікаті електронного підпису – удосконалений електронний підпис, що створюється з використанням кваліфікованого сертифіката електронного підпису, виданого кваліфікованим надавачем електронних довірчих послуг, та не містить відомостей про те, що особистий ключ зберігається у засобі кваліфікованого електронного підпису. Він має середній рівень захисту, але дозволяє ідентифікувати підписувача (його часто використовують для повсякденних дій, наприклад, надання звітності підприємцями).

Кваліфікований електронний підпис – удосконалений електронний підпис, що створюється з використанням засобу кваліфікованого електронного підпису і базується на кваліфікованому сертифікаті електронного підпису. КЕП має найвищий рівень захисту і забезпечує надійну ідентифікацію підписувача та цілісність даних. Кваліфікований електронний підпис має таку саму юридичну силу, як і власноручний підпис, та має презумпцію його відповідності власноручному підпису. Кваліфікована електронна печатка має презумпцію цілісності електронних даних і достовірності походження електронних даних, з якими вона пов'язана.

Електронний підпис та електронна печатка дають можливість організувати і підтримувати електронний документообіг у розумінні сукупності процесів створення, оброблення, відправлення, передавання, одержання, зберігання, використання та знищення електронних документів, що виконуються із застосуванням перевірки цілісності, ідентифікації автора та, у разі необхідності, з підтвердженням факту одержання таких документів.

Забезпечення електронної взаємодії двох або більше суб'єктів відбувається шляхом надання електронних довірчих послуг надавачем електронних довірчих послуг, якому ці суб'єкти довіряють.

Надавачі електронних довірчих послуг зобов'язані забезпечувати: відповідність засобів електронної ідентифікації встановленим рівням довіри, захист персональних даних користувачів, захист інформації і ІКС, що використовується для надання послуг електронної ідентифікації, здійснення ідентифікації фізичних та юридичних осіб під час надання послуг електронної ідентифікації, інформування користувачів про порушення конфіденційності та/або цілісності інформації, що впливають на надання їм послуг електронної

ідентифікації, постійне зберігання документів та електронних даних, отриманих під час реєстрації користувачів засобів електронної ідентифікації.

Статтею 16 Закону України [2] також визначаються вимоги до електронних довірчих послуг та їх склад. Зважаючи на різні рівні довіри, вони можуть бути як просто електронні довірчі послуги (забезпечують середній рівень довіри), так і кваліфіковані електронні довірчі послуги (забезпечують високий рівень довіри).

Таким чином, можна прийти до висновку, що законодавча база щодо проблематики використання електронного підпису та інших електронних засобів, які покликані підтвердити особу користувача, а також цілісність інформації, що циркулює в ІКС, загалом, напрацьована. На поточний час це дає можливість створити та забезпечити достатньо успішне функціонування низки загальнодержавних застосунків (наприклад, загальновідомий застосунок “Дія”).

Що стосується системи секретного документообігу, то частиною 2 статті 2 вищезначеного Закону України [2] наголошено, що цей Закон не поширюється на здійснення електронної ідентифікації та надання електронних довірчих послуг у системах, у яких обробляються службова інформація та державна таємниця, а також у системах, які використовуються виключно визначеною групою учасників на договірних засадах для внутрішніх потреб юридичних або фізичних осіб.

Проведений аналіз наявної законодавчої бази дає можливість зробити висновок, що, загалом, вона не унормовує документообіг електронних службових та секретних документів, а тому потребує уточнення.

Наразі, вважається, що кваліфікований електронний підпис, який базується на кваліфікованому сертифікаті електронного підпису, а також кваліфікована електронна печатка, що базується на кваліфікованому сертифікаті електронної печатки, є найбільш надійними засобами автентифікації користувача та підтвердження цілісності електронного документа. Тому, видається, що в ІКС забезпечення секретного електронного документообігу доцільно використовувати саме ці атрибути.

Разом з тим, для усунення вищезначеної законодавчої прогалини щодо унормування суспільних відносин при наданні послуг електронної ідентифікації та електронних довірчих послуг доцільно розробити проєкт Порядку надання та використання послуг електронної ідентифікації та електронних довірчих послуг (Порядок), які надаються за допомогою ІКС при обробленні службової інформації та інформації, що становить державну таємницю.

При цьому, до проєкту Порядку доцільно включити:

положення щодо того, що в ІКС, призначених для оброблення службової інформації та інформації, що становить державну таємницю (Закриті системи), повинні застосовуватися кваліфіковані електронні довірчі послуги;

положення, що для надання кваліфікованих електронних довірчих послуг у Закритих системах повинні використовуватися кваліфіковані електронні підписи та печатки, а також електронні підписи та печатки, які базуються на кваліфікованих сертифікатах відкритих ключів;

схеми взаємодії Закритих систем з ресурсами кваліфікованого надавача;

положення щодо того, що рішення про застосування конкретної схеми приймає власник Закритої системи з урахуванням особливостей її функціонування;

вимоги до кваліфікованих надавачів під час надання кваліфікованих електронних довірчих послуг у Закритих системах;

вимоги до ідентифікації користувачів Закритих систем під час формування та видачі кваліфікованого сертифіката відкритого ключа;

рекомендації щодо вибору квантовостійких криптоалгоритмів.

При цьому, вимога щодо вибору квантовостійких алгоритмів пов'язана з викликами, які невдовзі виникнуть після створення потужних квантових комп'ютерів.

Для прискорення процесів прийняття нормативно-правового акту пропонується затвердити Порядок наказом Адміністрації Держспецзв'язку та зареєструвати його у Міністерстві юстиції України.

Зважаючи на те, що проект Порядку передбачає використання кваліфікованих електронних довірчих послуг, доцільно було б до Закону України [2] включити положення про те, що порядок оброблення інформації в ІКС, у яких обробляється службова інформація та інформація, що становить державну таємницю, розробляється Адміністрацією Держспецзв'язку.

Одним із основних завдань при забезпеченні функціонування Закритих систем є захист інформації. Згідно із Законом України [6] захист інформації в ІКС забезпечується її власником, зусилля якого повинні бути спрямовані на запобігання порушенню цілісності, конфіденційності і доступності інформації. Важливо, що об'єктами захисту в ІКС є не тільки інформація, що обробляється в ній, а й програмне забезпечення, яке призначене для обробки цієї інформації.

Згідно з цим Законом України державні інформаційні ресурси повинні оброблятися в авторизованих системах з безпеки або системах, які мають сертифікати відповідності стандарту інформаційної безпеки та мають документальне підтвердження (рішення) щодо можливості функціонування, зважаючи на їх відповідність вимогам законодавства, національним стандартам та нормативним документам у сферах:

технічного захисту, що включає комплекс інженерно-технічних заходів та/або програмних і технічних засобів унеможливлення витоку, знищення та блокування інформації, порушення цілісності та режиму доступу до інформації;

криптографічного захисту, що реалізується шляхом перетворення інформації з використанням спеціальних (ключових) даних з метою приховування, відновлення змісту інформації, підтвердження її справжності, цілісності, авторства тощо;

кіберзахисту, як взаємопов'язаної сукупності організаційних, правових, інженерно-технічних заходів, а також заходів криптографічного та технічного захисту інформації, спрямованих на захист від кіберзагроз, забезпечення кібербезпеки, стійкості, цілісності, доступності та конфіденційності інформаційних ресурсів у кіберпросторі, а також здатності інфраструктури до їх обробки.

Інформація, що становить державну таємницю, має оброблятися у системі, об'єкті критичної інфраструктури із застосуванням комплексу технічного захисту інформації з підтвердженою відповідністю та за умови використання засобів криптографічного захисту суб'єктів господарювання, які провадять ліцензовану діяльність відповідно до законодавства.

Програмне забезпечення, що забезпечує функціонування інформаційних, електронних, комунікаційних, інформаційно-комунікаційних та технологічних систем, в яких обробляється інформація, що становить державну таємницю, використовується також за умови проведення державної експертизи у сфері захисту інформації.

Авторизація з безпеки, а також підтвердження дотримання вимог з безпеки систем, в яких обробляються державні інформаційні ресурси, здійснюється у відповідності до порядку, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України [3]. Згідно з цим порядком для ІКС розробляється три різновиди профілів безпеки:

базовий профіль безпеки – мінімальні вимоги з безпеки інформації та взаємопов'язана сукупність заходів щодо її захисту, які встановлюються залежно від інформації (відкрита інформація чи інформація з обмеженим доступом), або функціонального призначення такої системи;

галузевий профіль безпеки – взаємопов'язана сукупність заходів щодо захисту інформації, визначених органом державної влади у межах своїх повноважень у відповідній сфері або галузі (для відповідної категорії систем), залежно від інформації, що обробляється, з урахуванням базового профілю;

цільовий профіль безпеки системи – взаємопов'язана сукупність заходів із захисту інформації, визначених власником або розпорядником для відповідних систем з урахуванням базового та галузевого профілів, вимог законодавства та національних стандартів у сферах криптографічного та технічного захисту інформації, кіберзахисту, а також політик безпеки, призначення системи, її структурно-функціональних характеристик та особливостей функціонування, результатів проведеної оцінки (аналізу) ризиків безпеки.

Вищезазначеною постановою Кабінету Міністрів України визначені також процедурні особливості авторизації з безпеки для систем електронного документообігу, що не містять та містять інформацію з обмеженим доступом. Зокрема, авторизація з безпеки здійснюється для систем, щодо яких затверджено цільовий профіль. Під час розроблення та затвердження цільового профілю власник або розпорядник системи самостійно обирає національні стандарти у сферах технічного та криптографічного захисту інформації, кіберзахисту, засоби і методи здійснення таких заходів.

Оприлюднений базовий профіль безпеки [4] містить конкретні вимоги до побудови та експлуатації систем електронного документообігу, що містить відкриту та службову інформацію (базовий профіль безпеки для систем електронного документообігу, що містять секретну інформацію, надається встановленим порядком).

У загальному випадку до базового профілю з безпеки включені вимоги до побудови та управління системою, персоналу, порядку взаємодії з користувачами, оцінки та моніторингу безпеки, способів реагування на інциденти, методи фізичного захисту щодо доступу, методи забезпечення цілісності системи та інформації, перевірок системи тощо, покликані забезпечити безпеку оброблення інформації.

Що стосується регламентації чинними нормативно-правовими актами передавання інформації з обмеженим доступом, то згідно з чинним законодавством, замість використання комунікаційних мереж загального користування, рекомендується використання Національної електронної комунікаційної мережі (НЕКЗ) [5], як захищеної системи передавання інформації.

Типовим кроком при створенні будь-якої складної ІКС є попереднє розроблення її дослідної ділянки. Саме у процесі створення та дослідної експлуатації дослідної ділянки ІКС можна відпрацювати велику кількість проблемних питань, які б могли суттєво ускладнити побудову повноцінної ІКС. Тому реалізація етапу експериментального відпрацювання ІКС видається безальтернативною.

Також з метою унормування порядку поводження із секретними електронними документами в ІКС електронного секретного документообігу необхідно визначити поняття “електронний секретний документ” в нормативно-правових актах, що унормовують поводження з секретними паперовими документами.

Таким чином, реалізація вищезначених кроків може стати ключовим фактором у питанні розблокування напряду електронного секретного документообігу і дасть можливість започаткувати створення відповідних ІКС.

Науково-дослідна робота, висвітлена в цій статті, була завершена в серпні 2025 року.

Слід зазначити, що станом на лютий 2026 року прийняті наступні нормативні документи:

26 листопада 2025 року Кабінет Міністрів України затвердив нову редакцію постанови № 373, згідно з вимогами якої створення та/або обробка в ІКС електронних документів, аналоги яких на паперових носіях повинні містити власноручний підпис відповідно до законодавства, здійснюються із застосуванням електронного підпису чи печатки відповідно до Закону України “Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги” або Порядку, перевірка електронного підпису чи печатки в ІКС, у яких обробляється службова інформація та/або інформація, що становить державну таємницю, проводиться з дотриманням вимог Порядку, електронна ідентифікація та автентифікація користувачів в ІКС здійснюється відповідно до вимог статті 14 Закону України “Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги”, Порядку та інших нормативно-правових актів у сферах електронної ідентифікації та електронних довірчих послуг.

28 січня 2026 року наказом Адміністрації Державної служби спеціального зв’язку та захисту інформації України № 67/ДСК, що зареєстрований в Міністерстві юстиції України від 09.02.2026 за № 174/45568, затверджено “Порядок надання та використання послуг електронної ідентифікації та електронних довірчих послуг, які використовуються в ІКС, в яких обробляються службова інформація та державна таємниця”.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Розбудова законодавчої бази щодо забезпечення можливості створення систем електронного документообігу, що містить інформацію з обмеженим доступом, наразі не завершена. Зокрема, у нормативно-правових актах відсутнє поняття “електронний секретний документ” та не унормовано поводження з такими документами.

Для подальшого унормування питань щодо розвитку систем електронного документообігу, що містить інформацію з обмеженим доступом, видається доцільним вжити наступних заходів:

1) створити (можливо, декільком зацікавленим державним органам) дослідні ділянки ІКС для оброблення електронних документів, що містять службову та секретну інформацію, та, у процесі всебічних випробувань, дослідити їх роботоспроможність, виклики при розробленні профілів безпеки, можливості отримання сертифікатів тощо;

2) внести зміни до Закону України “Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги”, а також низки нормативно-правових актів, що регламентують поводження з паперовими секретними документами, передбачивши в них поняття “електронний секретний документ”.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення проєктів законодавчих актів та їх всебічне відпрацювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Закон України “Про електронні документи та електронний документообіг” від 22.05.2003 № 851-IV.
2. Закон України “Про електронну ідентифікацію та електронні довірчі послуги” від 05.10.2017 № 2155-VIII.
3. Постанова Кабінету Міністрів України “Деякі питання захисту інформаційних, електронних комунікаційних, інформаційно-комунікаційних, технологічних систем” від 18.06.2025 № 712.
4. Наказ Адміністрації Держспецзв’язку від 24.06.2024 № 317 “Про визначення Базового профілю безпеки інформації”. <https://www.cip.gov.ua/ua/doks/nakaz-administraciyi-derzhspeczv-yazku-vid-24-06-2024-317-pro-viznachennya-bazovogo-profilu-bezpeki-informaciyi>
5. Постанова Кабінету Міністрів України “Деякі питання функціонування Національної електронної комунікаційної мережі” від 16.12.2020 № 1358.
6. Закон України “Про захист інформації в інформаційно-комунікаційних системах” від 05.07.1994 № 80/94-ВР.

Стаття надійшла до редакції 22.01.2026, надійшла після рецензування 13.03.2026, прийнята 30.03.2026

REFERENCES

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (2003, May 22). *Pro elektronni dokumenty ta elektronnyi dokumentoobih* [On electronic documents and electronic document circulation] (No. 851-IV).
2. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017, October 5). *Pro elektronnu identyfikatsiiu ta elektronni dovirchi posluhy* [On electronic identification and electronic trust services] (No. 2155-VIII).
3. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2025, June 18). *Deiaki pytannia zakhystu informatsiinykh, elektronnykh komunikatsiinykh, informatsiino-komunikatsiinykh, tekhnologichnykh system* [Some issues of protection of information, electronic communication, information and communication, and technological systems] (No. 712).
4. Administration of the State Service of Special Communications and Information Protection of Ukraine. (2024, June 24). *Pro vyznachennia bazovoho profilu bezpeky informatsii* [On approval of the basic information security profile] (No. 317). <https://www.cip.gov.ua/ua/doks/nakaz-administraciyi-derzhspeczv-yazku-vid-24-06-2024-317-pro-viznachennya-bazovogo-profilu-bezpeki-informaciyi>
5. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2020, December 16). *Deiaki pytannia funktsionuvannia Natsionalnoi elektronnoi komunikatsiinoi merezhi* [Some issues of functioning of the National electronic communication network] (No. 1358).

6. Verkhovna Rada of Ukraine. (1994, July 5). *Pro zakhyst informatsii v informatsiino-komunikatsiinykh systemakh* [On protection of information in information and communication systems] (No. 80/94-VR).

The article was received 22.01.2026, received after revision 13.03.2026, accepted 30.03.2026

Горлинський Борис Вікторович

кандидат технічних наук, головний науковий співробітник, Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9993-2427> **e-mail:** vjzgoxnf@gmail.com

Бондаренко Дмитро Михайлович

начальник центру, Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. М. Залізняка, 3, корпус 6

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7815-6027> **e-mail:** dimbond@ukr.net

Лисенко Наталія Володимирівна

начальник відділу, Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. М. Залізняка, 3, корпус 6

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-9935-7646> **e-mail:** natalka.lsnk@ukr.net

Масленникова Тетяна Андріївна

кандидат педагогічних наук, доцент, заступник начальника центру, Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вул. М. Залізняка, 3, корпус 6

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6287-0878> **e-mail:** tmaslennykova@gmail.com

Курбет Павло Миколайович

доктор філософії (Ph.D.), молодший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0612-3859> **e-mail:** tovsba@gmail.com

УДК 681.5(042.3)

Oleksiy Semko¹, PhD, Researcher of Information Security Department
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6473-1329> **e-mail:** semalek@meta.ua

Denys Vinnichuk², PhD student
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9441-7696> **e-mail:** vinniboy2709@gmail.com

¹Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

²National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

HYBRID METHOD FOR TRACKING MOVING OBJECTS IN VIDEO STREAMS UNDER DYNAMIC OBSERVATION CONDITIONS

Abstract. A hybrid method for tracking objects in dynamic observation is proposed. Such conditions arise when the camera rotates and changes the zoom factor. The method uses the metadata of the camera position, including pitch, yaw, roll angles and zoom factors. The YOLO v8 artificial convolutional neural network was used as a detector. The main method of tracking the two is the stage of comparing detections and previous trajectories. At the first stage, the matching performed using the area overlap coefficient in pixel coordinates. At the second stage, the calculation of global coordinates is used based on the position of the object in the frame and the camera metadata. These global coordinates are using to predict the next position and compare with previous trajectories. The proposed method also allows determining the position of objects using data from altimeter sensors. The advantage of the proposed approach is the possibility of observation during sharp camera movements and changes in perspective. The method was experimentally tested on complex dynamic traffic scenes. The proposed method demonstrates higher metrics $IDF1 = 0.84$ and $MOTA = 0.81$ than standard algorithms on complex dynamic scenes. The method can be used in dynamic surveillance systems.

Keywords: computer vision, convolutional neural networks, classification, tracking of moving objects, dynamic observation.

О.В. Семко¹, Д.О. Віннічук²

¹Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

²Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

ГІБРИДНИЙ МЕТОД ВІДСТЕЖЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У ВІДЕОПОТОЦІ В УМОВАХ ДИНАМІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Анотація. Запропоновано гібридний метод відстеження об'єктів при динамічному спостереженні. Це умови, коли камера обертається та змінює коефіцієнт зумування. Метод використовує метадані положення камери, а саме кути тангажу, курсу та крену, а також коефіцієнт зумування. Як детектор було використано штучну згорткову нейронну мережу YOLO v8. Основною методу відстеження є двохетапне зіставлення детекцій та попередніх траєкторій. На першому етапі зіставлення відбувається класично за допомогою коефіцієнта площі перекриття в піксельних координатах. На другому етапі використовується розрахунок глобальних координат на основі

положення об'єкта на кадрі та метаданих камери. Ці глобальні координати використовуються для прогнозування наступного положення та зіставлення з попередніми траєкторіями. Запропонований метод також дозволяє визначати положення об'єктів відносно камери за допомогою даних від датчиків висотоміра. Перевагою запропонованого підходу є можливість здійснювати спостереження при різких рухах камери та зміні ракурсу. Було проведено експериментальне випробування методу на складних динамічних сценах дорожнього руху. Запропонований метод демонструє вищі метрики $IDF1 = 0.84$ та $MOTA = 0.81$, ніж стандартні алгоритми на складних динамічних сценах. Метод може бути використаний у системах динамічного спостереження.

Ключові слова: комп'ютерний зір, згорткові нейронні мережі, класифікація, відстеження рухомих об'єктів, динамічне спостереження.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.230-237>

Вступ

Технології комп'ютерного зору активно використовуються в системах безпеки, робототехніці, автономному транспорті, військовій справі тощо [1]. Зокрема, актуальним є завдання автоматичного відеоспостереження та інтелектуального аналізу просторових сцен, де наявні рухомі цілі. Виконання цих задач стає можливим як завдяки широкій доступності і здешевленню виробництва камер, так і значному збільшенню обчислювальних потужностей для обробки даних. Іншим фактором є значний прогрес у використанні методів штучного інтелекту. Основними етапами інтелектуального аналізу просторових сцен є: детекція, класифікація, відстеження, визначення характеристик об'єктів.

Особливу роль відіграє вирішення задачі відстеження об'єктів між кадрами відеопотоку, що дозволяє отримати відомості про поведінку об'єкта спостереження в часі та синтезувати оптимальну стратегію управління відповідно до функції цілі.

Аналіз літературних даних. Згорткові нейронні мережі (ЗНМ) зарекомендували себе як потужний інструмент, який здатний ефективно вирішувати задачі як детекції, так і класифікації [2]. Перевагою ЗНМ є здатність виділяти ознаки елементів зображення за умов зміни масштабу зображення і завад. При цьому слід враховувати те, що різноманітні архітектури моделювання інтелектуальної діяльності дозволяють визначити співвідношення між швидкістю, продуктивністю, точністю і ефективністю залежно від особливостей цієї задачі. Одноетапні згорткові нейронні мережі, такі як YOLO [3], дозволяють працювати в режимі реального часу за рахунок одноразової обробки зображення. Також слід враховувати те, що двоетапні нейронні мережі демонструють кращі значення основних метрик, але більший час швидкодії.

Такі характеристики переміщення об'єктів в просторі спостереження, як швидкість або траєкторія руху практично неможливо визначити без вирішення задачі відстеження, що дозволяє призначити об'єктам спостереження унікальні символічні ідентифікатори, які зберігаються в послідовності кадрів відеопотоку [4]. Таким чином, встановлюється відповідність між спостереженнями одного і того ж об'єкта і накопичується інформація про його переміщення. Цю задачу вирішують шляхом використання трекерів. Основним методом при вирішенні

такої задачі є “відстеження за детекцією”, тобто зіставлення результатів роботи детектора на окремих кадрах відеопотоку між собою. Процес відстеження умовно можна розділити на декілька етапів:

- прогнозування розташування об’єкта на кадрі з урахуванням інформації з попередніх кадрів;
- зіставлення з новими даними від детектора за допомогою деякої метрики та алгоритмів оптимізації;
- видалення незіставлених траєкторій та створення нових траєкторій.

Прикладами сучасних трекерів є ByteTrack [5], SORT, DeepSORT [6]. Сучасні трекери можуть використовувати як класичні, так і нейромереві алгоритмічні підходи для асоціації об’єктів та траєкторій.

Мета та задачі дослідження. Сучасні трекери переважно використовують тільки піксельне відображення сцени. Однак, одним з найбільших їх недоліків є неврахування динаміки спостереження, наприклад при обертанні камери. У такому разі обмежувальна рамка буде активно змінювати свої координати та розміри попри те, що об’єкт спостереження не змінював своє положення, а змінювався лише ракурс камери. Це може призвести до хибної зміни ідентифікатора, хибного визначення траєкторії та швидкості об’єкта спостереження. Для унеможливлення цього доцільним є використання трекеру, який враховує динаміку спостереження, а саме використовує простір ознак, що сформований з урахуванням обертання та зумування камери, що дозволяє вирішувати задачу відстеження об’єкта при різких рухах камери, або при тимчасовій втраті об’єкта спостереження.

Методика врахування особливостей динамічного спостереження

Як основний детектор для отримання координат обмежувальних рамок було обрано архітектуру YOLOv8 [7]. Зазвичай під час спостереження камера активно обертається та виконує зумування. Обертання може виконуватись за осями курсу (*Yaw*), тангажу (*Pitch*), крену (*Roll*) (Рис. 1). Зазвичай послідовність осей один від одного визначається в порядку *Yaw* -> *Pitch* -> *Roll*, що зумовлене конструкцією шарнірів сервоприводів, які обертають камеру. Однак воно може бути і інше в залежності від конструкції камери. Важливим параметром камери є фокусна відстань, яка відображає відстань від оптичного центру об’єктива до сенсора. Коротка фокусна відстань (одиниці мм) дозволяє отримати широкий кут зору, охоплюючи багато об’єктів з меншою деталізацією. Довша фокусна відстань (десятки мм) дозволяє отримати вузький кут зору, що може бути використано для спостереження за віддаленими об’єктами.

Камера може активно змінювати коефіцієнт зумування *zoom*, що фізично відображається як зміна фокусної відстані камери:

$$\begin{cases} f_{new} = f * zoom \\ \operatorname{tg}(\xi / 2) = \frac{w}{2f} \end{cases}, \quad (1)$$

де f – фокусна відстань без зумування; f_{new} – фокусна відстань з урахуванням зумування; ξ – кут поля зору камери; w – ширина сенсора.

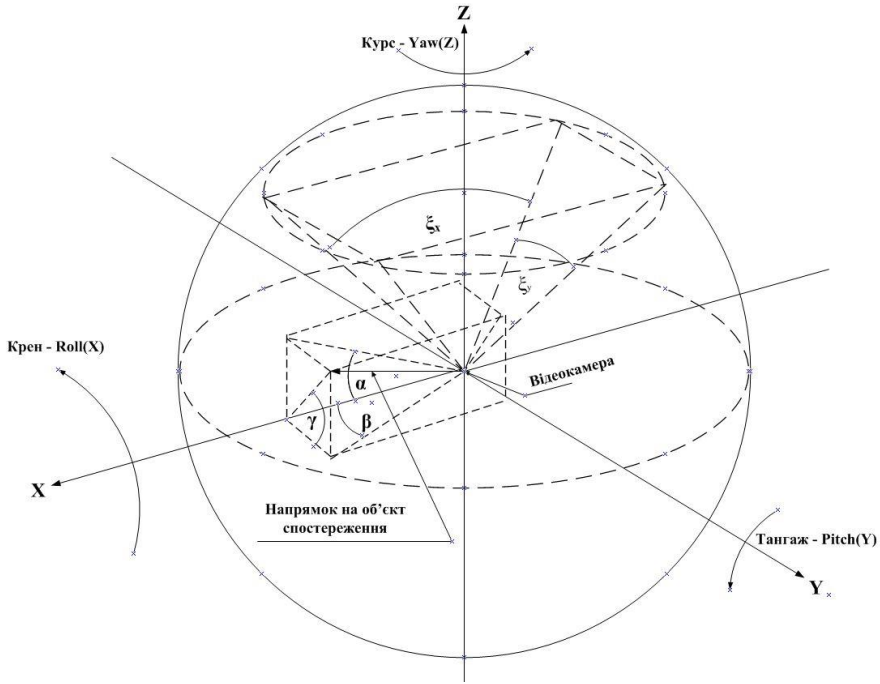


Рис. 1. Схема спостереження, де камера розглядається як центр сфери

Таким чином, виходячи зі співвідношення (1), можна визначити зміни поля зору камери:

$$\xi_{new} = 2 \arctg \left(\frac{w}{2 * f_{new}} \right) = 2 \arctg \left(\frac{w}{2 * f * zoom} \right) = 2 \arctg \left(\frac{\tg(\xi / 2)}{zoom} \right), \quad (2)$$

де ξ_{new} – кут огляду камери з урахування зумування. Співвідношення (2) показує залежність поля зору камери від величини коефіцієнта зумування.

Для того, щоб врахувати динаміку камери, було використано модель одиничної сфери. Нехай камера знаходиться в центрі та отримує зображення прямокутної проекції частини цієї сфери. Розмір зображення залежить від кутів огляду, а його положення залежить від значень кутів курсу, тангажу та крену камери. Якщо положення об'єкта на кадрі є центром обмежувальної рамки, яку повернула нейромережа, тоді, знаючи значення кутів огляду камери за горизонталлю й вертикаллю, можна знайти одиничний напрямний вектор на об'єкт спостереження:

$$\begin{cases} x_{image} = \frac{(u - w / 2)}{(w / 2)}; y_{image} = \frac{(v - h / 2)}{(h / 2)} \\ \theta = \arctg(x_{image} * \tg(\xi_{x_new})) \\ \varphi = \arctg(y_{image} * \tg(\xi_{y_new})) \end{cases}, \quad (3)$$

де x_{image}, y_{image} – відносні координати об'єкта на зображенні; u, v – піксельні координати об'єкта; w, h – ширина і висота кадру в пікселях; ξ_{x_new}, ξ_{y_new} – кути огляду камери за горизонталлю та вертикаллю з урахуванням коефіцієнта зумування; θ – полярний кут об'єкта спостереження; φ – азимутальний кут об'єкта спостереження. Таким чином, співвідношення (3) визначає сферичні координати кожного об'єкта спостереження в моделі одиничної сфери.

Для врахування обертання камери, потрібно послідовно врахувати матриці обертання по осях курсу, тангажу та крену камери.

$$R = R_y(\beta) R_z(\gamma) R_x(\alpha), \quad (4)$$

де R_x – матриця обертання навколо осі x ; α – кут тангажу; R_y – матриця обертання навколо осі y ; β – кут курсу; R_z – матриця обертання навколо осі z ; γ – кут крену. Таким чином, співвідношення (4) дозволяє визначити загальну матрицю обертання. У такому разі положення об'єкта з урахуванням повороту камери можна визначити як

$$V_{rot} = R * V, \quad (5)$$

де V_{rot} – вектор координат на одиничній сфері з урахуванням обертання; V – початковий вектор координат на одиничній сфері. Припускаючи, що спостереження ведеться за плоскою поверхнею, та виходячи зі значення висоти h розташування камери, визначимо координати об'єкта спостереження на плоскій поверхні:

$$\begin{cases} t = -y_{cam} / y_{obj} \\ x_{ground} = t * x_{obj} \\ y_{ground} = 0 \\ z_{ground} = t * z_{obj} \end{cases}, \quad (6)$$

де $x_{cam}, y_{cam}, z_{cam}$ – положення камери в просторі, $x_{ground}, y_{ground}, z_{ground}$ – реальне положення об'єкта на площині, $x_{obj}, y_{obj}, z_{obj}$ – положення об'єкта на одиничній сфері з урахуванням обертання та зумування камери. Таким чином, співвідношення (6) дає змогу визначити координати об'єкта відносно камери.

Відстеження рухомих об'єктів з використанням глобальних координат

У класичних підходах при вирішенні задачі відстеження використовуються піксельні координати об'єкта. У випадку рухомої камери доцільно також враховувати глобальні координати, оскільки вони не змінюються при обертанні або зумуванні камери. Розглядаючи найпростішу модель спостереження за плоскою поверхнею та припускаючи, що всі об'єкти інтересу знаходяться на ній, для відстеження можна використовувати тільки x_{ground} та z_{ground} . Основою

роботи методу відстеження є порівняння координат, отриманих на поточному кадрі з існуючими траєкторіями, які були розраховані на основі попередніх кадрів (Рис. 2).

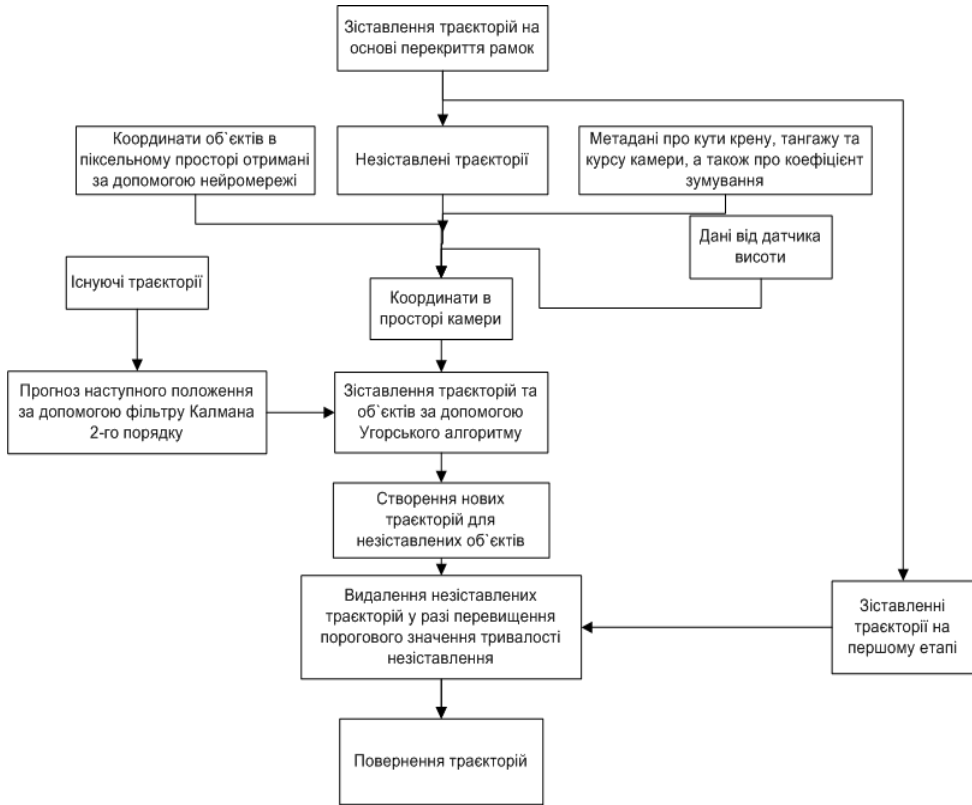


Рис. 2. Схема роботи алгоритму відстеження об'єктів в умовах динамічного спостереження

При ініціалізації алгоритму визначаються початкові траєкторії і ідентифікатори об'єктів спостереження. У подальшому на кожному етапі відстеження визначається передбачення координат об'єкта з використанням фільтра Калмана другого порядку [8]. Наступним кроком є зіставлення передбачених координат та об'єктів, що детектовані на поточному кадрі. Зіставлення відбувається у два етапи. На першому етапі як метрику використано IoU (коефіцієнт перекриття рамок), а як алгоритм оптимізації було обрано Угорський алгоритм. Використання такого підходу є класичним та дозволяє провести ефективно зіставлення у випадку, якщо камера є статичною. Рамки, які не були зіставлені з траєкторіями на першому етапі, проходять зіставлення на другому етапі, який враховує динаміку камери. Як метрику, яка використовується для формування матриці ціни, було обрано евклідову відстань між центрами об'єктів, розраховану на основі глобальних координат у просторі камери. Це дозволяє провести зіставлення при різких рухах камери або зумуванні. У випадку, якщо об'єкт не був знайдений на поточному кадрі, то траєкторія певну кількість кадрів зберігається в пам'яті. Значення кількості кадрів, яке визначає інтервал збереження траєкторії об'єкта в пам'яті, визначається динамічно та залежить від тривалості "життя" траєкторії:

$$N = \min(N_{min} + ka; N_{max}), \quad (7)$$

де N_{min} , N_{max} – мінімальна та максимальна кількість кадрів пам’яті; k – тривалість “життя” траєкторії (кількість попередніх кадрів упродовж яких об’єкт спостерігався); $a = 1$ – коефіцієнт зростання.

Застосування підходу з використанням співвідношення (7) дозволяє збільшити час пошуку об’єктів, які зазвичай швидко зникають із зображення і мають швидше видалятися з пам’яті. У випадку, якщо об’єкт не було зіставлено, то для нього створюється нова траєкторія та новий ідентифікатор.

Експериментальні дослідження

У результаті динамічного спостереження за складною сценою з декількома рухомими об’єктами, як за умови статичної камери, так і при змінах ракурсу та коефіцієнта зумування, було виміряно точність (*Identity Precision*) та повноту ідентифікації (*Identity Recall*), а також метрики точності багатооб’єктної відстежуваності (*Multiple Object Tracking Accuracy – MOTA*) та *F1*-метрику ідентичності (*IDF1*) (Таблиця 1). У результаті алгоритм показав приріст на всіх метриках, крім точності, порівняно з стандартним методом *ByteTrack* при вимірюванні на тій самій сцені.

Таблиця 1. Порівняння метрик

Назва алгоритму	IDF1	MOTA	Точність ідентифікації	Повнота ідентифікації
OCSORT	0.71	0.64	0.87	0.61
ByteTrack	0.81	0.76	0.87	0.74
Запропонований алгоритм	0.84	0.81	0.84	0.83

Головним недоліком запропонованого алгоритму є необхідність отримання метаданих від камери, що не завжди є можливим чисто технічно. Також метадані мають бути синхронізовані з зображенням, що не завжди вдається досягти на практиці.

Висновки

У результаті роботи запропоновано гібридний метод відстеження рухомих об’єктів з урахуванням динамічної моделі камери. Метод поєднує класичні підходи піксельного аналізу та алгоритм обчислення реальних глобальних координат відносно камери. Він використовує метадані від камери, а саме значення кутів крену, курсу, тангажу, а також коефіцієнт зумування, який являє собою відношення початкової та поточної фокусної відстані. Перевагою методу є його можливість відстеження об’єктів при активному зумуванні та зміні ракурсів камери. Алгоритм також дає змогу обчислити реальні, а не відносні швидкості та траєкторії об’єктів спостереження на основі моделі плоскої поверхні та даних від датчика висотоміра. Метод демонструє високі показники метрик порівняно з іншими класичними алгоритмами, а саме $IDF1 = 0.84$, $MOTA = 0.81$. Серед недоліків варто виділити необхідність постійного отримання метаданих від камери.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

1. Shen, Y. (2025). Computer vision: Technologies and applications. *Applied and Computational Engineering*, 163(1), 35–41. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/2025.23817>
2. Krichen, M. (2023). Convolutional neural networks: A survey. *Computers*, 12(8), 151. <https://doi.org/10.3390/computers12080151>
3. Dasi, M., & Deepa. (2025). Real time object detection using You Only Look Once (Yolo) algorithm. *International Journal of Engineering Technology and Management Sciences*, 9(4), 103–109. <https://doi.org/10.46647/ijetms.2025.v09i04.012>
4. Kadam, P., Fang, G., & Zou, J. J. (2024). Object tracking using computer vision: A review. *Computers*, 13(6), 136. <https://doi.org/10.3390/computers13060136>
5. You, L., et al. (2024). Multi-object vehicle detection and tracking algorithm based on improved YOLOv8 and ByteTrack. *Electronics*, 13(15), 3033. <https://doi.org/10.3390/electronics13153033>
6. Kusumah, A. P., et al. (2023). Counting various vehicles using YOLOv4 and DeepSORT. *Journal of Integrated and Advanced Engineering (JIAE)*, 3(1), 1–6. <https://doi.org/10.51662/jiae.v3i1.68>
7. Terven, J., Córdova-Esparza, D.-M., & Romero-González, J.-A. (2023). A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(4), 1680–1716. <https://doi.org/10.3390/make5040083>
8. Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35–45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>

Стаття надійшла до редакції 17.02.2026, надійшла після рецензування 17.03.2026, прийнята 07.04.2026

The article was received 17.02.2026, received after revision 17.03.2026, accepted 07.04.2026

Семко Олексій Вікторович

кандидат технічних наук, науковий співробітник відділу інформаційної безпеки Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України
Адреса робоча: 02000, Київ, Україна, Чоколівський бульвар, 13
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6473-1329> e-mail: semalek@meta.ua

Віннічук Денис Олександрович

аспірант кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України
Адреса робоча: вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-9441-7696> e-mail: vinniboy2709@gmail.com

УДК 621.391.6

Sergii Gnatiuk¹, Candidate of technical sciences, Principal research scientist
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1541-7058> **e-mail:** sgnatuk30@gmail.com

Jaroslav Hrokholskyi², Candidate of technical sciences, Associate Professor of the
Department of Automated Control Systems
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7550-5877> **e-mail:** GGYM@ukr.net

Lev Sakovich³, Candidate of technical sciences, research fellow
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8257-7086> **e-mail:** lev@sakovich.com.ua

¹State Scientific and Research Institute of Cybersecurity Technologies and Information Protection, Kyiv, Ukraine

²Military Institute of Telecommunications and Informatization named after Heroes Krut, Kyiv, Ukraine

³Institute of Special Communications and Information Protection of NTUU “KPI” named after Igor Sikorsky, Kyiv, Ukraine

CHORNOBYL ACCIDENT AND MILITARY RADIO COMMUNICATIONS: ANALYSIS OF ORGANIZATION AND FEATURES OF FUNCTIONING

Abstract. *The article examines the deployment process, dynamics of changes, and specific features of the military communication system within the 30-kilometer zone of the Chornobyl Nuclear Power Plant during the period from April 26, 1986, to December 5, 1986. Particular attention is paid to radio communication as the most operational means of communication under extreme conditions. The material is based on documents and orders of the operational group of the USSR Ministry of Defense (military unit 06407), daily statistical data, as well as the analysis of records in the communication department, orders of the leadership, and the results of their implementation.*

The study considers the interaction between military and civilian structures, emergency task adjustments, and the creation of additional communication elements that operated situationally and were not always documented. The findings allow tracing the peculiarities of information support and management in the conditions of initial chaos after the accident, and demonstrate the role of the military communication system in ensuring coordination of actions among various forces and structures. The historical experience of Chornobyl remains relevant for contemporary circumstances, as humanity once again faces the challenges of large-scale crises and military threats.

Keywords: *Chernobyl NPP, liquidation of the accident, military communications, operational group, orders, radio communications.*

© С.Є. Гнатюк, Я.М. Грохольський, Л.М. Сакович, 2026

С.Є. Гнатюк¹, Я.М. Грохольський², Л.М. Сакович³

¹ДержНДІ технологій кібербезпеки та захисту інформації, м. Київ, Україна

²Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації (ВІТІ) імені Героїв Крут, м. Київ, Україна

³Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації (ІСЗІ) НТУУ "КПІ" імені Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ЧОРНОБИЛЬСЬКА АВАРІЯ І ВІЙСЬКОВИЙ РАДІОЗВ'ЯЗОК: АНАЛІЗ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Анотація. У статті досліджено процес розгортання, динаміку змін та особливості функціонування системи військового зв'язку у 30-кілометровій зоні ЧАЕС у період з 26.04.1986 до 05.12.1986 р. Основна увага приділена радіозв'язку як найбільш оперативному засобу комунікації в екстремальних умовах. Матеріал базується на документах та наказах оперативної групи МО СРСР (в/ч 06407), щоденних статистичних даних, а також аналізі записів у відділі зв'язку, наказів керівництва та результатів їх реалізації.

Розглянуто взаємодію військових і цивільних структур, екстрене корегування завдань та створення додаткових елементів зв'язку, що діяли ситуативно й не завжди відображалися документально. Отримані результати дозволяють простежити особливості інформаційного забезпечення та управління в умовах початкового хаосу після аварії, а також показують роль системи військового та спеціального зв'язку у забезпеченні координації дій різних сил і структур. Історичний досвід Чорнобиля має актуальне значення для сучасних умов, коли людство знову стикається з викликами масштабних криз і воєнних загроз.

Ключові слова: ЧАЕС, ліквідація аварії, військовий зв'язок, оперативна група, накази, радіозв'язок.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.238-250>

Вступ

Аварія на Чорнобильській атомній електростанції 26 квітня 1986 року стала однією з наймасштабніших техногенних катастроф ХХ століття, наслідки якої відчуваються й сьогодні. Вона продемонструвала не лише небачену силу атомної енергії, але й вразливість людських систем управління, технічних засобів та організаційних структур у кризових умовах. Подібні події у світі – аварія на АЕС Трі-Майл-Айленд (США, 1979 р.) та катастрофа на АЕС Фукусіма (Японія, 2011 р.) – підтверджують, що ризики атомної енергетики мають ймовірнісний характер і залежать від поєднання природних та людських факторів.

У кризових ситуаціях особливого значення набуває людський фактор. Він проявляється як у героїчних діях рятувальників, військових та цивільних служб, так і у негативних формах поведінки – паніці, дезінформації, спробах уникнути відповідальності. В умовах початкового хаосу після аварії на ЧАЕС ключовим завданням стало забезпечення достовірного інформаційного обміну та створення надійних каналів зв'язку. Саме вони дозволяли координувати дії різних структур, приймати оперативні рішення та спрямовувати ресурси на ліквідацію наслідків катастрофи.

Військовий зв'язок, зокрема радіозв'язок, відіграв провідну роль у забезпеченні комунікації в 30-кілометровій зоні відчуження. Його гнучкість, мобільність та здатність швидко адаптуватися до змінних умов зробили його основним інструментом управління в екстремальній ситуації. Вивчення досвіду організації та функціонування системи зв'язку у цей період є важливим не лише для історичного аналізу, але й для сучасних умов, коли людство знову стикається з викликами масштабних криз і воєнних загроз.

Постановка завдання. У період з 04.10.1986 р. до 05.12.1986 р. автори Сакович Л.М. і Грохольський Я.М. послідовно в часі виконували обов'язки старших офіцерів відділу зв'язку оперативної групи МО СРСР, на який були покладені задачі організації і забезпечення діючого зв'язку по управлінню військами, що займались ліквідацією аварії на ЧАЕС. Офіцери відділу на всіх етапах ліквідації аварії забезпечували неперервне чергування по підтримуванню системи у належному стані й оперативному розв'язанню назрілих проблем, знаходились у роз'їздах у межах 30-кілометрової зони і спеціальної зони (ЧАЕС) для розв'язання завдань зв'язку, оцінки місць розгортання засобів зв'язку, прокладання кабельних ліній, забезпечення взаємодії в питаннях зв'язку різних внутрішньозонових і позазонових структур, розв'язання екстрених питань зв'язку, оцінки екстремальних ситуацій, уточнення на місцях прийнятих рішень.

Фізичну суть різних фізичних процесів, які розглядаються у статті, соціальний аспект техногенних ситуацій, вплив на навколишнє середовище і земну кору динамічних ядерних ударів, специфіку партійного керівництва автори статті аналізували сумісно, допомогу в цьому надав фізик д.п.н., к.ф.-м.н. Сусь Б.А.

У зазначений період конкретизувались особливості та характер військового зв'язку в екстремальних умовах, які відповідають техногенній аварії на ЧАЕС. З плином років не раз проявлялись екстремальні умови забезпечення військового зв'язку, зокрема, сьогодні наша держава у процесі ведення бойових дій.

Аналізуючи подібні ситуації, автори оцінювали загальні тенденції, які характерні для військового зв'язку в таких критичних ситуаціях і конкретизуються у статті, з певною корекцією на час та технічні можливості.

Аналіз останніх публікацій. Наскільки відомо авторам, узагальнених даних щодо військового зв'язку у Чорнобильській зоні з 26.04.1986 р. до кінця того ж року у публікаціях не виявлено. Це, як нам здається, пов'язано з тим, що під кінець року зв'язок був переданий цивільній обороні, а накази по військових частинах та оперативній групі роз'їхалися у різні місця та осіли згодом у різних архівах. Деякі дані авторами були опубліковані в [1–3]. Більш повний аналіз, характерні особливості управління в умовах техногенних невизначеностей, кореляція із сьогоденням подаються у запропонованій статті. Певні уточнення щодо використання техніки зв'язку, конкретних місць її розміщення і функціонування були отримані авторами від виявлених пізніше виконавців на той час наказів та розпоряджень. Стан, який виник у Чорнобильській зоні, пов'язаний з екстремальними умовами, які утворилися внаслідок техногенної катастрофи, специфікою місцевого і загального управління, значною невизначеністю ситуації, швидкою зміною динаміки і можливими катастрофічними наслідками прийнятих рішень. Різні облікові дані у такій динаміці були неповними, часто накази були авральними, мало дублювалися письмово, управління – у телефонному режимі, або ситуаційним на місцях.

З дня аварії і по серпень 1986 року система зв'язку кількісно нарощувалась і її функціонування супроводжувалось структурними та організаційними перетворюваннями, пов'язаними із збільшенням кількості військових частин і цивільних структур, задіяних для ліквідації наслідків аварії, динамікою, багатоваріантністю, складністю і певною невизначеністю кінцевих результатів рішень багатьох задач, які ставились, з необхідністю термінової реалізації експрес-наказів керівних органів в екстрених випадках, постійної корекції і зміни планів, забезпечення ефективної взаємодії структурних елементів всього контингенту ліквідаторів. На кінець цього періоду визначились найбільш інтенсивні інформаційні напрямки, стабілізувалась кількість військових частин, в основному визначилась географія місць виконання робіт, що дало можливість перейти від кількісних показників у нарощуванні системи зв'язку до вдосконалення її структури, раціональнішому використанню сил і засобів зв'язку, певному їх скороченню. У першу чергу обмежувалось застосування радіо- і супутникового зв'язку, основна увага приділялась використанню кабельних і радіорелейних ліній зв'язку, а також орендованих у Міністерства зв'язку каналів.

Деякі дані щодо зазначених у поданому дослідженні апаратних і апаратури, які використовувались у системі військового зв'язку, основні принципи її застосування представлені у відкритих веб-сайтах [4]. Деталізація деяких специфічних алгоритмів функціонування аналізується в [5–8].

Відмітимо, що подані нижче результати основані на джерелах інформації, які відображались документально і в сукупності сформували основну достатньо тривалу і стабільну (базову) складову загального зв'язку. Обсяг реального зв'язку був більшим. Зокрема, не повністю врахована система цивільного зв'язку, міліції, КГБ, мобільного зв'язку із рухомими об'єктами, екстрено створеними в інтересах ліквідації аварії та розв'язання ситуаційних завдань. Проблемним і практично неможливим було врахування зв'язків із автотранспорту органів управління в умовах динаміки переміщень, термінових нетривалих напрямків радіозв'язку за допомогою мобільних радіостанцій у межах створюваних і переформованих структур та їх використання. Статистика не враховує частини екстрених і польових зв'язків між палатками, апаратними, різними утвореннями за допомогою кабелю П-274 та телефонних апаратів ТА-57 чи подібних засобів зв'язку, із-за відсутності зафіксованих даних про створення таких зв'язків. В основі цивільного зв'язку були стаціонарні канали, частина із яких орендувалась в інтересах військового зв'язку. Міліція і КГБ використовували для аналізу та розв'язання екстрених завдань мобільний зв'язок за допомогою своїх портативних радіостанцій та канали цивільного і військового зв'язку.

Відмітимо також, що є значна кореляція між тими екстремальними умовами забезпечення зв'язку і його забезпеченням в сучасних умовах техногенних, природних і соціальних ризиків та ведення бойових дій. Але змінився технічний стан засобів зв'язку, стали страшнішими новітні озброєння, зросли можливості ворога протидіяти в усіх сферах управління та зв'язку, використовувати інформаційні та кібератаки, розладнувати фізично та засобами РЕБ систему зв'язку. Протидія стосується також всіх сфер суспільного життя, питань економіки, фінансів, оборони, природних ресурсів, суспільних та міждержавних відносин, питань відстоювання суверенітету та незалежності, мови, єдності нації та церкви. Екстремальні умови можуть

виникнути і при розладнанні систем мобільного зв'язку, до якого населення звикло. Такий стан підсилює те, що стара система стаціонарного телефонного зв'язку скорочується і стає вторинною.

Формулювання мети статті. Метою статті є: а) аналіз особливостей формування військового зв'язку в техногенних умовах, які відповідають аварії на ЧАЕС; б) виявлення узагальнених даних, використання яких можливе і доцільне в інших екстремальних умовах; в) уникнення певних помилок в об'єктивному врахуванні нестандартних умов забезпечення зв'язку; г) розширення кола читачів та орієнтованих на подібну складну тематику спеціалістів важливістю технічно-техногенних проблем, які можуть виникнути у сфері сучасних технологій; д) оцінка небезпеки проявлення людських психічно-шизофренічних, маніакально-одержимих і диктаторських факторів стосовно прийнятих їх носіями неадекватних, катастрофічних за наслідками рішень, проти чого мають бути створені невідворотні гарантовані міжнародні засоби протидії.

Виклад основного матеріалу

Аналіз динаміки утворення і функціонування системи військового зв'язку

Організація і розвиток системи військового зв'язку з моменту аварії і до 05.12.86 р., певні узагальнення і статистичні матеріали характеризуються наступними даними. Деякі можливості апаратних розкриті в [4].

1. Для забезпечення зв'язком сформованої оперативної групи КВО в район аварії (м. Прип'ять) 26.04.86 р. були виділені засоби зв'язку від 113 бригади зв'язку КВО і розгорнутий вузол зв'язку (ВЗ) “Волномер”* у складі: станція супутникового зв'язку Р-440-О – 1 к-т; апаратна засекреченого зв'язку П-244 ТМ – 1 к-т; комплекс гарантованого засекречування мовних сигналів Т-222 П – 1 к-т.

*назви вузлів і апаратури зв'язку надані у російськомовному варіанті (на час функціонування зв'язку).

2. 27.04.86 р. о 9.50 був утворений телефонний засекречений канал гарантованої стійкості („Булава” – апаратна Т-222 П) із вузлом зв'язку ГШ ЗС СРСР “Рубин” за допомогою системи космічного зв'язку і канал тимчасової стійкості (Т-217) із використанням каналу ТЧ, а з вузлом зв'язку штабу КВО “Легенда” – два телефонні зв'язки тимчасової стійкості (Т-217).

До кінця дня 27.04.86 р. ВЗ “Волномер” був підсилений апаратною П-238 Т для забезпечення телеграфним засекреченим зв'язком гарантованої стійкості із ВЗ “Рубин” і чотирма КШМ Р-142 для забезпечення управління загонами радіаційної розвідки. Цього ж дня для управління авіацією окремим полком зв'язку військово-повітряних сил КВО був розгорнутий ВЗ “Привал” у складі: П-244 Т – 1 к-т; радіорелейної станції Р-409 – 1 к-т; радіостанції Р-140 – 1 к-т.

Від ВЗ “Привал” були забезпечені телефонні засекречені зв'язки тимчасової стійкості (Т-217) із ВЗ штабу ВПС КВО “Десна”, ВЗ “Волномер” і ВЗ аеродрому м. Чернігова “Маятник”. З гелікоптерами, які виконували різні завдання, був передбачений радіозв'язок. Відомо, в яких пекельних умовах працювали ці гвинтокрилі машини і люди в них, зависаючи у стовпі атмосфери, яка світилася від радіаційного опромінення, над роздертим жерлом блоку, щоб скинути туди свинець та пісок і приглушити викиди. Ці машини

із-за високого вторинного опромінення знайшли своє пристанище у могильниках, а люди – в лікарнях і – жахлива невідворотність – на цвинтарях.

3. 29.04.86 р. ВЗ “Волномер” і ВЗ “Привал” були передислоковані, з метою зменшення опромінення особового складу, а також впливу радіації на напівпровідники в апаратурі зв’язку, із м. Прип’ять у м. Чорнобиль, звідки організувала свою роботу оперативна група КВО під керівництвом заступника командувача військами округу. Пізніше частина засобів зв’язку разом із транспортною базою теж була похоронена в могильниках.

Зазначимо, що з часом людська жадоба, безвідповідальність та ігнорування безпекою запустили механізм розкрадання могильників і радіація почала розповзатися по Україні, приносячи нещастя не в одну сім’ю.

4. 4.05.86 р. у м. Чорнобиль прибула оперативна група МО СРСР (40 осіб) під керівництвом Головнокомандувача військами Південно-Західного напрямку.

Для забезпечення управління військами хімічного захисту, інженерними військами, частинами цивільної оборони (ЦО), медичними частинами, які прибували в район 30-кілометрової зони, 4 і 5 травня 1986 р. ВЗ “Волномер” підсилюється засобами зв’язку і додатково розгортаються: а) ВЗ ЗКП ОГ МО СРСР у м. Іванків; б) допоміжний ВЗ у районі н. п. Орانه; в) радіорелейні лінії: Р-409 (м. Іванків – н. п. Орانه); Р-404 (м. Іванків – ВЗ ЗКП КВО “Труборез”); Р-409 (м. Іванків – м. Чорнобиль); Р-409 (м. Чорнобиль – н. п. Орانه); допоміжний ВЗ “Волномер-1” у районі н. п. Опачичі під Чорнобилем, де було поселене керівництво.

5. У сховищі цивільної оборони (під адміністративним корпусом) на АЕС був розгорнутий 6.05.86 р., в інтересах забезпечення управління силами і засобами, які знаходились безпосередньо на АЕС, вузол зв’язку “Пробег”, з комутаторами та апаратурою засекречування. Були підсилені засобами зв’язку робочі місця голови урядової комісії і керуючого складу міністерств на АЕС і в м. Чорнобилі.

6. 9.05.86 р. було прийняте рішення на організацію управління по секторах (уся 30-кілометрова зона була розділена на три сектори і одну особливу зону територія – район АЕС). У зв’язку з цим були сформовані три вузли зв’язку, які 11 травня 1986 року прибули в район зосередження і розгорнулись: ВЗ “Разворот” (сектор № 1) – у районі н. п. Пірки (потім переміщений в район н. п. Рудаков); відповідальний БВО; ВЗ “Славянка” (сектор № 2) – у районі н. п. Терехов; відповідальний КВО; ВЗ “Станица” (сектор № 3) – у районі н. п. Діброва (потім переміщений в район н. п. Радча); відповідальний ПриКВО.

Вузли зв’язку зон були з’єднані з ВЗ МО “Волномер” в Чорнобилі і з ВЗ своїх штабів лініями кабельного, радіорелейного, тропосферного і супутникового зв’язків. Для підвищення пропускної здатності і надійності виходу на мережі зв’язку Міністерства оборони і Міністерства зв’язку силами радіорелейного батальйону КВО була побудована радіорелейна лінія прив’язки з використанням РРС Р-404. За допомогою закинутої, але відремонтованої силами зв’язківців повітряної лінії зв’язку був забезпечений вихід із ВЗ “Волномер” на один із опорних ВЗ КВО.

Створення вузлів зв’язку секторів дозволило в умовах радіоактивного зараження, динаміки робіт і переміщень забезпечити більш стійке і оперативніше управління підлеглими військовими частинами і підрозділами. У кожному секторі було організовано по одній станції фельд’єгерсько-поштового зв’язку (СФПС).

Прийняті заходи забезпечили всі види зв'язку від базового ВЗ “Волномер” у м. Чорнобилі (телефон, телеграф, кольоровий фототелеграф, фельд’єгерсько-поштовий) з ВЗ ГШ “Рубін” (Москва), ВЗ КВО “Легенда” (Київ), ВЗ “Каскад” Південно-Західного оперативного напрямку (Кишинів). Акцент здійснювався на засекречений зв'язок.

7. Досвід організації і забезпечення зв'язків, набутий за цей час, показав, що частини цивільної оборони, окремі медичні батальйони, частини і підрозділи тилу, інженерні та хімічні війська своїми штатними засобами зв'язку не здатні забезпечити зв'язки в потрібному об'ємі, який визначався екстремальністю і динамізмом ситуації, характером задач ліквідації, що призводило до необхідності виділення в їх розпорядження засобів зв'язку за рахунок інших військових частин. Це в певній мірі додатково підривало боєготовність військових частин, з'єднань та округів щодо основного їх призначення через необхідність направляти війська зв'язку у Чорнобильську зону, послаблюючи систему власного управління.

Враховуючи вплив радіації на здоров'я і можливі мутації при народженні дітей, було прийняте рішення на заміну особового складу строкової служби сімейними призовниками запасу, в яких уже були діти, але цей процес відбувався достатньо мляво, враховуючи, що призовникам треба було платити гроші на рівні їхніх зарплат із коефіцієнтом підвищення.

8. Зазначимо, як показує досвід, що у початковий період будь-якої несподіваної, екстреної, динамічної ситуації (техногенні, природні катаклізми, воєнні дії, терористичні акції, масштабні аварії) зв'язок можливий тільки за допомогою мобільних і портативних радіозасобів. У Чорнобильський період їх не вистачало. Радіостанції типу Р-105М, Р-107М недостатньо компактні, застарілі, потребують солдата для переноски, утворюють на одній частоті мережу із кількох абонентів (один говорить – всі слухають), комутація абонентів між собою неможлива. Значно зручнішими були малогабаритні радіостанції Р-148, Р-157, Р-158, але їх майже не було, їх терміново замовляли на військових складах для виконання задач, що планувались (зокрема, ручне очищення даху 4-го блоку). Більш зручними були міліцейські радіостанції (ГОСТи 16019-70, 16019-78), але їх було дуже мало.

Специфіку зв'язку часто визначав характер роботи, яку треба було виконати. Зокрема, коли використання різних механічних роботів, які керувались дистанційно по радіоканалах з використанням систем відеоспостереження, показало свою неефективність, було прийнято рішення очищати дах від уламків за допомогою людей у відносно (стосовно сотень і тисяч рентген) захисній екіпіровці. Ліквідатори по черзі пролазили через люк, маючи для зв'язку портативну радіостанцію, якою, як виявилось, незручно користуватись у протигазі та грубих рукавицях, і в межах кількох хвилин скидали вниз все, що можна було скинути. Щоб не було затримок за роботою понад встановлений час, на даху був поставлений дзвін, мотузок від якого тягнувся у внутрішнє приміщення, щоб відкликати з даху людину. Віддалено, з іншого корпусу, велося спостереження за допомогою відеокамери і радіозв'язком з приміщеннями, в яких готували та очищали людей.

Сьогодні вже 40-а річниця Чорнобильської аварії. Але питання щодо ліквідації техногенних аварій до сьогодні є досить актуальні, і позитивний досвід, отриманий ще в 1986 році, необхідно пам'ятати і за необхідності застосовувати.

Ці питання значно загострились внаслідок ведення бойових дій по всій території України, тому існує реальна загроза пошкодження не тільки блоків атомних електростанцій, але і сховищ відпрацьованого радіоактивного палива. Це можливе на усій території держави, як в тилу, так і поблизу ведення бойових дій. Насамперед мова йде про Запорізьку та Чорнобильську АЕС, де пошкодження або руйнування сховищ радіоактивних відходів може призвести до радіоактивного зараження великих територій не тільки України, а й сусідніх європейських держав. Тому доцільно використання досвіду щодо організації робіт, логістики і зв'язку з врахуванням сучасних реалій.

За даними Міністерства оборони Британії, ще до березня 2023 року російські війська вже облаштували бойові позиції на кількох дахах із шести корпусів реакторів Запорізької АЕС. Тобто техногенної катастрофи ще немає, але ж до неї вже потрібно готуватися і враховувати досвід далекого 1986 року.

Мета цієї статті, серед авторів якої є ліквідатори аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році, узагальнити досвід організації робіт в екстремальних умовах і відпрацювати конкретні рекомендації щодо їх застосування в зонах техногенних екологічних катастроф.

Чорнобильська катастрофа показала практичну неспроможність діючої системи управління в умовах радіоактивного зараження густонаселеної місцевості. Тільки на основі повного аналізу реальної обстановки можливо було прийняти зважені рішення з ліквідації техногенних катастроф.

Необхідно оперативно отримувати достовірну інформацію про реалізацію керуючих впливів для своєчасного їх коректування та отримання максимальної ефективності зусиль з ліквідації наслідків техногенних катастроф.

Керівництво держави повинно бути повністю поінформоване про ситуацію, плани, наміри і можливості відомств, які відповідальні за дії в надзвичайних ситуаціях.

У надзвичайних умовах незамінними і ефективними є мобільні засоби зв'язку самих різних видів – від переносних радіо- і супутникових станцій до радіорелейних і тропосферних станцій з автономним електроживленням. При цьому дуже важливим є сумісність засобів і каналів зв'язку.

Найбільш ефективним сьогодні є використання програмно-керованих засобів зв'язку для обміну інформацією в цифровому вигляді.

Для негайного вирішення надзвичайних завдань із організації зв'язку вкрай важливим є наявність достатнього резерву сил і засобів.

9. Для забезпечення високої оперативності передачі кольорової картографічної інформації про радіаційну обстановку і динаміку проведення очищувальних робіт було прийнято рішення про використання комплексу “Цвет” (76В157) у напрямках: ВЗ “Волномер” – ВЗ “Рубин” (Чорнобиль – Москва); ВЗ “Волномер” – ВЗ “Каскад” (Чорнобиль – Кишинів).

10. До серпня 1986 року продовжувалось кількісне нарощування системи зв'язку, структурні та організаційні зміни. Усього було утворено 63 вузли зв'язку, у тому числі: ВЗ ПУ ОГ МО СРСР (912 ОГ) – 1; ВЗ особливої зони – 1; ВЗ секторів – 3; ВЗ допоміжних ПУ – 2; ВЗ з'єднань і військових частин – 56.

Протяжність ліній зв'язку склала 1432 км, у тому числі: радіорелейних – 516 км; тропосферних – 120 км; кабельних – 796 км; прийнято 65 орендованих у Міністерства зв'язку каналів; організовано напрямків космічного зв'язку – 6.

У системі зв'язку було задіяно: особового складу – 1702 чол., у тому числі: офіцерів – 148 чол.; прапорщиків – 139 чол.; солдат і сержантів – 1376 чол.; жінок – 39 чол.; автомобілів – 379, із них спеціальних – 298.

Усього було організовано зв'язків – 169, із них засекречені з гарантованою стійкістю – 34, з тимчасовою стійкістю – 87.

11. 3 серпня 1986 року кількісне нарощування системи зв'язку припинилось, більша увага надавалась її вдосконаленню, раціональному використанню сил і засобів, щоб понизити кількісні показники і підготувати систему осінньо-зимового періоду експлуатації. Визначилась стабільна (базова) частина системи зв'язку, яка дозволила забезпечити необхідні оперативність і гнучкість в управлінні, що пов'язано із динамікою обстановки, задачами військам і постійними їх переміщеннями. До базової структури під'єднувались чи від'єднувались місцеві елементи зв'язку (у залежності від характеру виконуваних робіт).

12. З метою недопущення втрат інформації і несанкціонованого доступу до неї були вжиті заходи:

а) з оперативними групами секторів і всіма підлеглими військовими частинами був організований, в основному, засекречений зв'язок по каналах і лініях військової системи польового зв'язку і по провідних каналах державної мережі зв'язку. Тропосферний зв'язок використовувався як резервний;

б) була заборонена робота радіозасобів у короткохвиловому діапазоні, за винятком радіомережі радіаційної обстановки, для якої був визначений режим роботи “чергове приймання”. Робота засобів радіозв'язку дозволялась тільки при втраті всіх видів зв'язку і з дозволу ПУ зв'язком ОГ МО СРСР;

в) за роботою і станом радіомереж був установлений радіоконтроль силами чотирьох постів контролю безпеки зв'язку;

г) скорочувалась кількість абонентів відкритого зв'язку.

13. У зв'язку з тим, що терміни ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС затягувались і в принципі не були чітко визначеними, війська зв'язку та інші військові формування розпочали готувати місця свого розміщення і вузлів зв'язку до роботи в зимових умовах. Розпочались роботи по переформуванню в м. Чорнобилі ВЗ “Волномер” у стаціонарний варіант функціонування. Ці роботи були завершені близько 20.10.86 р. Без потреби, дублюючі зв'язки були ліквідовані, частина засобів зв'язку була вивільнена.

Деякі узагальнення процесу функціонування зв'язку

Загальні підсумки обміну інформацією з 27 квітня по 24 листопада 1986 року у створеній системі військового зв'язку, організованій для управління процесами ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС, наступні*:

проведено переговорів – 1376572, із них ЗАС – 766550; передано ТЛГ ЗАС телеграм/слів – 9125/ 962620; прийнято ТЛГ ЗАС телеграм/слів – 7994/ 938297; передано спецстрічок (“Ляхта”) – 10735; передано факсимільних повідомлень (“Цвет”): кольорової графічної інформації (ЦГИ) – 1503, звичайної графічної інформації (ОГИ) – 348; прийнято: ЦГИ – 425, ОГИ – 348; коефіцієнт справної дії (КСД) базової системи зв'язку – приблизно 97%.

*узагальнення основані на даних, які були документально зафіксовані.

Середні значення за місяць з 27.4.86 р. по 24.11.86 р.:

проведено переговорів – 183203, із них ЗАС – 106665; передано ТЛГ ЗАС телеграм/слів – 1270/133947; прийнято ТЛГ ЗАС телеграм/слів – 1110/130564;

передано спецстрічок (“Лахта”) – 1492; передано ЦГИ – 210, ОГИ – 69; прийнято ЦГИ – 58, ОГИ – 49; КСД – приблизно 97%; дещо нижчий він був у квітні-травні і вищий після вересня 1986 року.

Цілеспрямованого заважання функціонуванню системи зв’язку, радіоелектронного подавлення (РЕП) не спостерігалось. Дози радіації поза зоною ЧАЕС, які діяли на засоби зв’язку, дозволяли підтримувати зв’язок у задовільному стані. Вплив високих рівнів радіації, з метою досліджень, на зв’язок не передбачався, технологічно був складний і небезпечний для життя. Металеві поверхні засобів зв’язку та різних технологічних систем були джерелом вторинного опромінення, яке часто перевершувало допустиму дозу. Покази дозиметрів індивідуального використання у кінці робочого дня, як правило, перевищували максимальне значення шкали. Цим користалися деякі особи, що були у відносно безпечному місці стосовно рівня радіації, і щоб “накачати” собі рентгенів залишали на ніч засоби вимірювання у місцях з високим фоном радіації. Тому були встановлені норми опромінення: у межах 30-кілометрової зони – 0,3 рентген на добу, у межах спеціальної зони (блоки АЕС) – 1 рентген на добу, хоча, у залежності від діяльності ліквідатора, місця його знаходження, динаміки переміщень і тривалості перебування у проблемних точках, можна було “зловити” десятки і сотні рентген, у багатьох проявлялись блювотні рефлекси, а пізніше у шпиталях – психофізіологічні розлади.

Технічна сторона функціонування системи зв’язку виявила достатньо високу інтенсивність виходу із ладу пристрою УПС-9,6 (модем зі швидкістю обміну 9,6 кбіт/с) комплексу Т-230 (“Интерьер”), для ремонту і заміни плат постійно знаходились представники заводу-виготовлювача. Були часті відмови блоків комплексу “Цвет”, який використовувався сеансами, але за рахунок резервування технічні проблеми майже не впливали на неперервність передачі і прийому чорно-білої і кольорової графічної інформації (передавалась відображені на карті зміни стосовно прийнятих рішень і результатів робіт). Відмітимо, що реалізовані в цій апаратурі методи підвищення вірогідності передачі цифрової інформації дозволили достатньо ефективно вести обмін по неякісних каналах. Це питання актуальне для сучасних засобів зв’язку при роботі по неякісних каналах, а також в умовах радіоелектронного подавлення (РЕП) радіотрактів, при високих ймовірностях помилок на одиничний елемент ($BER \geq 10^{-3}$).

Інша несправна у системі зв’язку апаратура по мірі можливості ремонтувалась або замінювалась на справну, якщо така була в наявності. Питання ремонту замикалось на екіпажах апаратних і станцій з використанням ЗІП та допомоги сусідніх по розміщенню засобів зв’язку. Певних централізованих пересувних органів моніторингу та допомоги не було, більш складні технічні питання аналізувались у телефонному режимі з прийняттям певних рішень, деколи тривалих щодо виконання, з використанням окружної бази КВО по зберіганню і ремонту техніки зв’язку та можливостей цивільних структур.

Зазначимо, що для забезпечення роботи **складних комплексів** “Булава” та “Интерьер” потрібні **якісні канали зв’язку**, інакше мовний синтезований звук на приймальній стороні стає незрозумілим. Якість реальних каналів часто суттєво погіршувалась із-за впливу характеристик неякісних трактів передачі сигналів в умовах експлуатації, що вимагало постійних регулювальних операцій та використання резервних каналів. Порівнюючи із сьогоденням,

подібна апаратура може розміститися на столі, забезпечуючи значно якісніший зв'язок (на рівні всім відомого мобільного).

Переміщення транспорту, роботи по дезактивації приводили до обривів кабельних ліній, ділянки яких достатньо оперативно замінювали лінійні підрозділи військових частин.

Апаратні зв'язку, антенні системи, обслуговуючі структури, виходячи із динамічної ситуації та відсутності супротивних дій, не маскувались. Зрозуміло, що такий стан недопустимий в умовах сучасної практики ведення бойових дій і можливостей противника щодо дезорганізації і знищення.

Станом на 5.12.86 р. відділ зв'язку ОГ МО СРСР був скорочений і складався із 4 офіцерів (начальника відділу і 3 старших офіцерів), які здійснювали загальне керівництво системою зв'язку. З початку 1987 року управління системою зв'язку було передано цивільній обороні.

Висновки

Дослідження показало, що організація військового радіозв'язку під час аварії на ЧАЕС стала ключовим чинником у забезпеченні управління, координації та оперативного інформування керівництва держави. Самовіддана робота військових і цивільних фахівців у надзвичайних умовах дозволила створити ефективну систему зв'язку, яка забезпечувала ліквідацію наслідків катастрофи та підтримку життєдіяльності залучених сил.

Аналіз досвіду Чорнобиля підтвердив, що у техногенних і бойових умовах пріоритетним є використання радіозасобів різних діапазонів, з підвищеними захисними характеристиками та резервними режимами роботи. Важливим є врахування вразливості мобільних систем, необхідність дотримання режиму радіомовчання, застосування коротких засекречених повідомлень і маскування технічних засобів.

Практичне значення отриманих висновків полягає у можливості їх використання для організації зв'язку в інших екстремальних ситуаціях, уникненні типових помилок та підвищенні стійкості систем управління. Соціальний аспект досвіду ЧАЕС засвідчив як прояви патріотизму й самопожертви, так і небезпеку інформаційного замовчування, що ускладнює прийняття адекватних рішень.

Таким чином, результати дослідження підкреслюють необхідність поєднання технічних рішень із міжнародними гарантіями протидії деструктивним людським факторам, що здатні призвести до катастрофічних наслідків.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гитман, Н.С., Сакович, Л.Н. (2004). Обеспечение управления ликвидации последствий: уроки Чернобыля. Зв'язок, 2, 68–69.
2. Грохольський, Я.М., Сакович, Л.Н. (2011). Забезпечення військового зв'язку в початковий період ліквідації аварії на ЧАЕС. Зв'язок, 1, 74–77.
3. Грохольський, Я.М., Сакович, Л.М., Гіренко, І.М. (2021). Уроки Чорнобиля: військовий зв'язок у період ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС. Військова дипломатична академія. Вісник воєнної розвідки, 65, 24–30.

4. <https://www.google.com/search?q=в/ч+06407&oq;>
<http://www.an500.narod.ru/r440o/r440o/index.htm>; <https://affinage.org.ua/apparatura-svyazi-p-244tn/>; <http://www.russianarms.ru/forum/index.php?topic=533.0>;
http://radiopribor.narod.ru/About_company/index.html; www.russianarms.ru › forum;
loveread.ec › read_book; <https://www.google.com/search?q=П-238Т>; www.russianarms.ru › forum;
<https://www.google.com/search?q=P-409>; [ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org/wiki/P-140) › wiki › P-140;
<https://www.google.com/search?q=76B157>; www.russianarms.ru › forum;;
[google.com/search?q=П-205](https://www.google.com/search?q=П-205); <https://military.trcvr.ru/2015/12/12/radiostancija-r-410/>;
<https://www.google.com/search?q=аппаратура+зас+т-230>. – 2021–2025.
5. Беллами, Дж. (2004). Цифровая телефония (Пер. с англ.). М.: Эко-Трендз.
6. Рихтер, С.Г. (2010). Кодирование и передача речи в цифровых системах подвижной радиосвязи. М.: Горячая линия-Телеком.
7. Шнайер, Б. (2003). Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке СИ (Пер. с англ.). М.: Триумф.
8. Столлинкс, В. (2001). Криптография и защита сетей. Принципы и практика. (2-е издание, Пер. с англ.). М.: Вильямс.

Стаття надійшла до редакції 28.01.2026, надійшла після рецензування 27.02.2026, прийнята 20.03.2026

REFERENCES

1. Hytman, N. S., & Sakovich, L. N. (2004). *Obespechenie upravleniia likvidatsii posledstviu: uroki Chernobylia* [Support for management of disaster response: Lessons of Chornobyl]. *Zviazok*, (2), 68–69. [in Russian]
2. Hrokholskyi, Ya. M., & Sakovich, L. N. (2011). *Zabezpechennia viiskovoho zviazku v pochatkovyi period likvidatsii avarii na ChAES* [Provision of military communications during the initial period of liquidation of the Chornobyl NPP accident]. *Zviazok*, (1), 74–77. [in Ukrainian]
3. Hrokholskyi, Ya. M., Sakovich, L. M., & Hirenko, I. M. (2021). *Uroky Chornobylia: viiskovyi zviazok u period likvidatsii naslidkiv avarii na ChAES* [Lessons of Chornobyl: Military communications during the liquidation of the consequences of the Chornobyl NPP accident]. *Visnyk voiennoi rozvidky*, (65), 24–30. [in Ukrainian]
4. <https://www.google.com/search?q=в/ч+06407&oq;>
<http://www.an500.narod.ru/r440o/r440o/index.htm>; <https://affinage.org.ua/apparatura-svyazi-p-244tn/>; <http://www.russianarms.ru/forum/index.php?topic=533.0>;
http://radiopribor.narod.ru/About_company/index.html; www.russianarms.ru › forum;
loveread.ec › read_book; <https://www.google.com/search?q=П-238Т>; www.russianarms.ru › forum;
<https://www.google.com/search?q=P-409>; [ru.wikipedia.org](http://ru.wikipedia.org/wiki/P-140) › wiki › P-140;
<https://www.google.com/search?q=76B157>; www.russianarms.ru › forum;;
[google.com/search?q=П-205](https://www.google.com/search?q=П-205); <https://military.trcvr.ru/2015/12/12/radiostancija-r-410/>;
<https://www.google.com/search?q=аппаратура+зас+т-230>. – 2021–2025.
5. Bellamy, J. (2004). *Tsifrovaia telefoniia* [Digital telephony] (Trans. from English). Eko-Trendz. [in Russian]
6. Richter, S. G. (2010). *Kodirovanie i peredacha rechi v tsifrovyykh sistemakh podvizhnoi radiosvyazi* [Speech coding and transmission in digital mobile radio communication systems]. Goriachaia liniia-Telekom. [in Russian]
7. Schneier, B. (2003). *Prikladnaia kriptografiia. Protokoly, algoritmy, iskhodnye teksty na iazyke SI* [Applied cryptography: Protocols, algorithms, and source code in C] (Trans. from English). Triumf. [in Russian]
8. Stallings, W. (2001). *Kriptografiia i zashchita setei. Printsipy i praktika* [Cryptography and network security: Principles and practice] (2nd ed., Trans. from English). Viliams. [in Russian]

The article was received 28.01.2026, received after revision 27.02.2026, accepted 20.03.2026

Гнатюк Сергій Євгенович

кандидат технічних наук, ст. дослідник, головний науковий співробітник ДержНДІ технологій кібербезпеки та захисту інформації

Адреса робоча: 03142 Україна, м. Київ, вул. Максима Залізняка, 3, корпус 6

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1541-7058> **e-mail:** sgnatuk30@gmail.com

Грохольський Ярослав Михайлович

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних систем та технологій Військового інституту телекомунікацій та інформатизації (ВІТІ) імені Героїв Крут, 2 категорія ліквідатора, радіотелеграфіст 1 класу при проходженні строкової служби і виконанні завдань в екстремальних умовах

Адреса робоча: 01011 Україна, м. Київ, вул. Князів Острозьких, 45/1

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7550-5877> **e-mail:** GGYM@ukr.net

Сакович Лев Миколайович

кандидат технічних наук, доцент, науковий співробітник Науково-дослідного центру Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації (ІСЗІ) НТУУ "КПІ" імені Ігоря Сікорського, 1 категорія ліквідатора

Адреса робоча: 03056 Україна, м. Київ, вул. Верхньоключова, 4

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8257-7086> **e-mail:** lev@sakovich.com.ua

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

Oleg Klymenkov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> **e-mail:** oleg@klymenkov.com

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

METHODOLOGICAL BASIS OF CYBERINSURANCE RISK ASSESSMENT

Abstract. *The main objective of the study is to formulate methodological foundations for assessing cyber insurance risks. The work defines the main terms related to cyber insurance, systematizes and analyzes cyber insurance risks, presents objects (processes) that will be subject to automation in the future, and cyber insurance algorithms. The objectives of the study are to determine the foundations of the methodology for assessing cyber insurance risks and cyber insurance within the framework of the proposed cyber insurance model, which considers the basic maturity levels of the main categories of participants in the insurance market of Ukraine and can be used in practical business activities.*

The methodological framework includes a description of the procedure for assessing cyber insurance (cyber insurance maturity), which complies with the provisions of the International Standard ISO/IEC 27102:2019(E) Information Security Management – Guidelines for Cyber Insurance and the Regulations on the Organization of Measures to Ensure Information Security and Cyber Protection by Financial Service Providers, approved by the Resolution of the Board of the National Bank of Ukraine dated 09.12.2025 No. 143. The basis of the procedure is the assessment of the development and implementation of cyber risk management processes and information security risks, as well as measures to ensure information security and cyber protection, considering the peculiarities of the functioning of the information and communication systems of the financial service provider within the framework of a risk-based approach.

The paper proposes a hybrid model for assessing information security risks, cyber risks and cyber insurance maturity (RA&CImm), criteria for determining risks and the level of IT maturity of the cyber insurance model, as well as the domain structure of the cyber insurance index (cyber insurance maturity).

The results obtained can be used for planning and implementing cyber insurance by financial service providers (insurance market participants), as well as for comparative analysis with other approaches and insurance models, as well as the domain structure of the cyber insurance index (cyber insurance maturity).

Keywords: *cyber insurance; information security; cyber risks; information security risks; cyber risks and cyber insurance maturity model.*

М.М. Худинцев, О.А. Хоменко, О.А. Клименков

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

МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКІВ КІБЕРСТРАХУВАННЯ

***Анотація.** Основною метою дослідження є формулювання методологічних основ оцінювання ризиків кіберстрахування. В роботі виконане визначення основних термінів, пов'язаних з кіберстрахуванням, систематизовані та проаналізовані ризики кіберстрахування, наведені об'єкти (процеси), які у подальшому підлягатимуть автоматизації, алгоритми кіберстрахування. Завдання дослідження полягають у визначенні основ методології оцінювання ризиків кіберстрахування та кіберстрахування в рамках запропонованої моделі кіберстрахування, яка враховує базові рівні зрілості основних категорій учасників страхового ринку України та може бути використана у практичній господарській діяльності.*

Методологічні основи включають опис процедури оцінювання кіберстрахування (зрілості кіберстрахування), які відповідають положенням Міжнародного стандарту ISO/IEC 27102:2019(E) Управління інформаційною безпекою – Вказівки щодо кіберстрахування та Положення про організацію заходів із забезпечення інформаційної безпеки та кіберзахисту надавачами фінансових послуг, затвердженого Постановою Правління Національного банку України від 09.12.2025 р. № 143. Основу процедури складає оцінювання розроблення та запровадження процесів управління кіберризиками та ризиками інформаційної безпеки, а також заходів із забезпечення інформаційної безпеки та кіберзахисту з урахуванням особливостей функціонування інформаційно-комунікаційних систем надавача фінансових послуг в межах ризик-орієнтованого підходу. У роботі запропоновано гібридну модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки, кіберризиків та зрілості кіберстрахування (RA&CISM), критерії визначення ризиків та рівня IT-зрілості кіберстрахування моделі, а також доменну структуру індексу кіберстрахування (зрілості кіберстрахування). Отримані результати можна використовувати для планування та здійснення кіберстрахування надавачами фінансових послуг (учасниками ринку страхування), а також для порівняльного аналізу з іншими підходами та моделями страхування.

***Ключові слова:** кіберстрахування; інформаційна безпека; кіберризики; ризики інформаційної безпеки; модель ризиків та зрілості кіберстрахування.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.251-261>

Вступ

Питання кіберстрахування, відповідного оцінювання ризиків інформаційної безпеки та кіберризиків є предметом постійної уваги та розвитку [1-5]. Автоматизація процесів страхування і кіберстрахування у світі є головним технічним трендом останніх 5-10 років [6, 7]. Питання ризиків інформаційної безпеки та кібербезпеки в своїх роботах протягом того самого часу досліджували Д.В. Габбард, Р. Сейерсен, К.Дж. Годсон, Е. Вілер, Б. Біджіо, Ф. Ролі, Дж.Р.К. Нерс, Б. Шнайер, М. Кері, Дж.Дж. Лі, О. Сантос, Л. Каргілл,

Р. Росс, К. Мітнік, Р. Андерсон. Проблеми кіберстрахування та пов'язані з ними проблеми оцінювання ризиків вивчали Ж. Вольф, Г.С. Буп, Дж. Ребгольц, Р. Рутан, С. Романоський, Р. Теланг, Р. Парізі, Д. Вудс, Т. Мур, М. Елінг, В. Шнелль, Л. Аблон, А. Кюн, Т. Джонс. Серед українських авторів за цією тематикою можна зазначити А. Задорожну, Н. Нагайчук, М. Дубину, Ю. Калайду, О. Новицьку, Б. Орловського, А. Шкирю, В. Ємельянова.

Нормативну основу оцінювання ризиків та кіберстрахування складають національний стандарт ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013 (ІЕС/ISO 31010:2009, IDT) «Керування ризиком – Методи загального оцінювання ризику» [8], Міжнародний стандарт ISO/IEC 27102:2019(E) «Управління інформаційною безпекою – Керівні принципи кіберстрахування» [9], Рамка сертифікації кібербезпеки ЄС. Регламент (ЄС) 2019/881 [10], Рамка управління ризиками кібербезпеки Національного інституту стандартів і технологій (NIST CSWP 29, 2022) [11], постанови Національного банку України [12-15].

Актуальні питання моніторингу та управління ризиками інформаційної безпеки, кіберризики, страхування та кіберстрахування активно обговорюються у світовій науковій та бізнес спільноті, кількість відповідних публікацій зростає надзвичайно високими темпами (див. огляди [16-18]).

Основні визначення та терміни

- **Кіберстрахування** – це механізм захисту бізнесу від фінансових втрат, пов'язаних з кібератаками та витоком даних (Федеральна торгова комісія США / FTC) [20]. 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) [21].
- **Ризик-орієнтований підхід** – прийняття управлінських рішень щодо впровадження заходів з інформаційної безпеки та кіберзахисту на підставі аналізу порівняння поточних ризиків інформаційної безпеки і кіберризиків з прийнятними (Національний банк України / НБУ) [12].
- **Кіберризик** – ризик виникнення збитків та/або додаткових втрат внаслідок реалізації кіберзагроз щодо інформаційних ресурсів та/або інформаційної інфраструктури. Кіберризик є складовою операційного ризику (Національний банк України / НБУ) [12, 22].
- **Операційний ризик** – ризик того, що недоліки інформаційних систем або внутрішніх процесів, людські помилки, операційні збої (помилки чи затримки під час оброблення, перебої в роботі систем, кіберінциденти, недостатня пропускну спроможність), втрата або витік інформації, шахрайство або порушення в управлінні внаслідок зовнішніх подій призведуть до скорочення, погіршення або зупинення надання послуг (Національний банк України / НБУ) [22].

- **Ризик інформаційної безпеки** (складова операційного ризику) – імовірність виникнення збитків або додаткових втрат, або недоотримання запланованих доходів унаслідок порушення конфіденційності, цілісності, доступності даних в інформаційних системах кредитної спілки, недоліків або помилок в організації внутрішніх процесів або настання зовнішніх подій, включаючи кібератаки або неадекватну фізичну безпеку. Ризик інформаційної безпеки включає кіберризик (Національний банк України / НБУ) [23].

Ризики інформаційної безпеки та кіберризик

- Несанкціонований доступ
- Витік конфіденційної інформації
- Фішинг (Phishing)
- Шкідливе програмне забезпечення (Malware)
- Атаки вимагачів (Ransomware)
- DDoS-атаки
- Вразливості програмного забезпечення
- Zero-day уразливості
- Внутрішні загрози (Insider Threats)
- Компрометація облікових записів
- Атаки на ланцюги постачання (Supply Chain Attacks)
- Помилки конфігурації
- Втрата доступності інформації
- Порушення цілісності даних
- Недостатній контроль доступу
- Ризики хмарних технологій
- Кіберризик критичної інфраструктури
- AI та LLM-ризик
- Репутаційні втрати
- Регуляторні ризики (Regulatory & Compliance Risks)

Модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки, кіберризиків та зрілості кіберстрахування

Модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки, кіберризиків та зрілості кіберстрахування (Risk Assessment & Cyber Insurance Maturity Model / RA&CIMM) – це гібридна модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки, кіберризиків, кіберстрахування (зрілості кіберстрахування) суб'єктів (учасників) ринку страхування та надавачами фінансових послуг¹.

Домени RA&CIMM:

- Експертна модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки та кіберризиків
- Мережева модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки та кіберризиків
- Модель оцінювання кіберстрахування (зрілості кіберстрахування)

¹ терміни «учасники ринку страхування» та «надавачі фінансових послуг» визначаються законодавством України

RA&CİMM базується на принципах системного підходу, ризик-орієнтованого управління та багаторівневої верифікації результатів. Основною метою моделі є визначення інтегрального індексу, що характеризує суб'єкта (організацію) або інформаційну (комунікаційну) систему в цілому, на основі сукупності часткових індикаторів (підіндексів), кожен з яких характеризує окремий домен моделі.

Індекс моделі I можна представити у наступному вигляді:

$$I = \sum_l I_l = \sum_{jl} \alpha_{jl} p_j d_l ,$$

де $p_j d_l$ визначають окремі внески (для окремих ризиків або показників зрілості), l – номер домену моделі d_l , перехресні вагові коефіцієнти α_{jl} визначаються для окремих внесків до підіндексів моделі I_l експертним методом. Зазначимо, що наведений перелік доменів d_l у загальному випадку може змінюватися.

Модель передбачає чотири послідовні рівні оцінювання, що забезпечують поступове підвищення точності та достовірності результатів:

- Самооцінювання (self-assessment)
- Зовнішнє оцінювання (external assessment)
- Експертна оцінка (expert review)
- Повторне оцінювання (re-assessment)

В рамках моделі розроблені та запропоновані оригінальні опитувальники [24-26], адаптовані під вимоги [9-12] та особливості моделі. Результати оцінювання складають основу відповідних підіндексів.

Початковий експертний профіль індексу моделі (з поясненнями) наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1. Початковий експертний профіль індексу RA&CİMM

Основні підіндекси	Додаткові підіндекси	Початкове значення	Пояснення
Оцінювання ризиків (експертний)	Governance Risk	0,08	Характеризує якість управління кібербезпекою, наявність політик, розподіл відповідальності та участь керівництва
	Technical Vulnerability Risk	0,10	Оцінює технічні вразливості, швидкість патч-менеджменту та рівень захищеності інфраструктури
	Threat Exposure Risk	0,07	Визначає рівень зовнішнього впливу загроз та доступність організації для потенційного нападника
	Operational Resilience Risk	0,05	Характеризує резервування (backup, disaster recovery) та стійкість до інцидентів
	Human Factor Risk	0,05	Враховує рівень обізнаності персоналу, фішингові (fishing) вразливості та загрози від внутрішнього порушника (insider threats)

	Third-Party and Supply Chain Risk	0,05	Пов'язаний із ризиками постачальників та залежністю від зовнішніх сервісів
	Compliance Risk	0,05	Відображає відповідність нормативним вимогам
	Financial and Insurance	0,05	Оцінює очікувані збитки, страхове покриття та загальну можливість страхування
Оцінювання ризиків (мережевий)	Penetration testing	0,10	Оцінює рівень захищеності шляхом моделювання реальних кібератак та визначення можливості експлуатації вразливостей
	Vulnerability assessment	0.10	Відображає наявність, критичність і кількість технічних вразливостей у програмному забезпеченні, мережах та інфраструктурі
	OSINT-automatic	0,02	Оцінює рівень зовнішньої інформаційної експозиції за даними у відкритому доступі
	Attack surface management	0,03	Враховує масштаб, видимість та рівень захищеності зовнішньої цифрової поверхні
Оцінювання зрілості	Self-assessment	0,10	Використовує внутрішню оцінку на основі власного аналізу політик, процесів, контролів та ресурсів організації
	External assessment	0,10	Оцінює фактичний стан шляхом незалежної перевірки та аудиту зовнішніми експертами або спеціалізованими організаціями
	Re-assessment	0,05	Оцінює динаміку змін рівня ризику та ефективність впроваджених заходів захисту

Визначення вагових коефіцієнтів здійснювали за допомогою методу Analytic Hierarchy Process (AHP) [27]. Процедура передбачає формування експертної групи з подальшим формуванням матриці парних порівнянь та перевіркою узгодженості через коефіцієнт послідовності (consistency ratio).

Основні етапи оцінювання:

- ідентифікація (інвентаризація) активів
- ідентифікація загроз
- визначення вразливостей
- оцінювання ймовірності реалізації та впливу загроз
- оцінювання зрілості
- визначення базового ризику
- коригування ефективності засобів захисту
- інтеграція показників зрілості
- визначення індексу, загальне оцінювання.

Використання інформаційних технологій, засобів автоматизації у відповідних бізнес-процесах досліджено у [6, 7].

Критерії визначення ризиків інформаційної безпеки та кіберризиків (100 – максимальний ризик):

- 0–20 – дуже низький
- 21–40 – низький
- 41–60 – середній
- 61–80 – високий
- 81–100 – критичний.

Критерії визначення рівнів ІТ-зрілості кіберстрахування (100 – максимальний рівень):

- 0–20 – початковий (хаотичний)
- 21–40 – повторюваний
- 41–60 – встановлений
- 61–80 – керований
- 81–100 – оптимізований.

Відповідно до ризиків та рівнів ІТ-зрілості кіберстрахування формуються рекомендації щодо пріоритетності заходів реагування, розміру страхового покриття, рівня франшизи, обсягу інвестицій тощо.

Висновки

Розроблено методологічні основи оцінювання ризиків кіберстрахування, які базуються на ризик-орієнтованому підході та враховують положення стандарту ISO/IEC 27102:2019(E), а також національні нормативні вимоги щодо забезпечення інформаційної безпеки та кіберзахисту у фінансовому секторі України. Основу розробки складає алгоритм оцінювання рівня впровадження процесів управління кіберризиками, ризиками інформаційної безпеки та заходів кіберзахисту з урахуванням особливостей функціонування інформаційно-комунікаційних систем суб'єктів ринку страхування та фінансових послуг.

Запропонована гібридна модель оцінювання ризиків інформаційної безпеки, кіберризиків та зрілості кіберстрахування (RA&CMM), яка поєднує ризиковий і maturity-підходи. У межах моделі визначено критерії оцінювання ризиків та рівнів ІТ-зрілості кіберстрахування, а також сформовано доменну структуру інтегрального індексу зрілості кіберстрахування. Це дозволяє здійснювати комплексне оцінювання стану кіберстрахування, визначати слабкі місця в системі управління ризиками та формувати обґрунтовані рекомендації щодо підвищення рівня кіберстійкості.

Результати роботи можуть бути використані у практичній діяльності надавачів фінансових послуг та учасників ринку страхування для планування, впровадження та вдосконалення процесів кіберстрахування. Запропонована модель також може бути застосована як інструмент порівняльного аналізу існуючих підходів і моделей кіберстрахування, а також як основа для подальшої автоматизації процедур оцінювання та прийняття рішень у сфері кіберстрахування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Munich Re. (2026, March 25). Cyber insurance: Risks and trends 2026. <https://www.munichre.com/en/insights/cyber/cyber-insurance-risks-and-trends-2026.html>
2. Silverfort. (2025). The new cyber insurance requirements: What to know & how to comply. <https://www.silverfort.com/wp-content/uploads/2025/02/ebook-cyber-insurance-identity-security.pdf>
3. Federation of European Risk Management Associations (FERMA). (2025, October 6). Demystifying cyber insurance: Today's trends & tomorrow's challenges. <https://ferma.eu/wp-content/uploads/2025/10/Demystifying-Cyber-Insurance-todays-trends-tomorrows-challenges.pdf>
4. American Academy of Actuaries. (2025, May). Reinsurance. <https://www.actuary.org/wp-content/uploads/2025/05/6Reinsurance.pdf>
5. Keyfactor. (2025). NIS2 directive solution brief. <https://www.keyfactor.com/resources/nis2-directive-info/nis2-solution-brief>
6. Худинцев, М. М., & Хоменко, О. А. (2026). Інформаційні технології кіберстрахування. *Електрон. Моделювання*, 48 (1), 33-50. ISSN 0204–3572. ISSN 0204–3572. <https://doi.org/10.15407/emodel.48.01.033>
7. Khudyntsev, M., & Khomenko, O. (2025). Automation of standardized cyber insurance processes. *Environmental Safety and Natural Resources*, 54(2), 143-153. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.143-153>
8. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. (2015). Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ДСТУ ІЕС/ISO 31010:2013). <https://wiki.nazk.gov.ua/wp-content/uploads/2020/10/UA-dstu-31010.pdf>
9. International Standard ISO/IEC 27102:2019(E) Information security management – Guidelines for cyber-insurance. First edition 2019-08.
10. EU Cybersecurity Certification Framework (Regulation (EU) 2019/881). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/881/oj/eng>
11. 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>
12. Національний банк України (2025). Про затвердження Положення про організацію заходів із забезпечення інформаційної безпеки та кіберзахисту надавачами фінансових послуг, Постанова Правління НБУ № 143 (2025, 09 грудня). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0143500-25#Text>
13. Національний банк України (2023). Про затвердження Положення про авторизацію надавачів фінансових послуг та умови здійснення ними діяльності з надання фінансових послуг, Постанова Правління НБУ № 199 (2023, 29 грудня). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0199500-23#Text>
14. Національний банк України (2023). Про затвердження Положення про вимоги до системи управління страховика, Постанова Правління НБУ № 194 (2023, 27 грудня). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0194500-23#Text>
15. Національний банк України (2023). Про затвердження Положення про застосування Національним банком України коригувальних заходів, заходів раннього втручання, заходів впливу у сфері державного регулювання діяльності на ринках небанківських фінансових послуг, Постанова Правління НБУ № 183 (2023, 25 грудня). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0183500-23#Text>
16. 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>
17. 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>

18. 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/43250d49df871cfdbf7024c2a03b2c1007c55ec9>
19. Худинцев, М. М., Жилін, А. В., & Давидюк, А. В. (2021). Світові індекси кібербезпеки: огляд та методики формування (Глобальний звіт / Каталог). Київ: Міжнародний університет кібербезпеки, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова НАН України. ISBN 978-966-136-887-2. 240 с.
20. Federal Trade Commission (FTC) (2024). Cyber insurance. <https://www.ftc.gov/business-guidance/small-businesses/cybersecurity/cyber-insurance>
21. 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>
22. Національний банк України (2024). Про затвердження Інструкції з оцінювання на відповідність міжнародним стандартам oversайту суб'єктів, які виконують функції центрального депозитарію цінних паперів, центрального контрагента, торгового репозиторію та системи розрахунків у цінних паперах в Україні, Постанова Правління НБУ № 38 (2024, 5 квітня). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0038500-24/ed20240405#n35>
23. Національний банк України (2024). Про затвердження Положення про вимоги до системи управління кредитною спілкою, Постанова Правління НБУ № 15 (2024, 02 лютого). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0015500-24/ed20240202#n63>
24. Худинцев, М. М., & Хоменко, О. А. (2026). Оцінювання рівня цифрової зрілості та кіберстрахування учасників страхового ринку України [Questionnaire]. Google Forms. <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeg0pw-c4t2--OUvOA9fYxINCKHMNJ2exQACTv1zsZwLh-bQA/viewform?usp=publish-editor>
25. Худинцев, М. М., & Хоменко О. А. (2026). Оцінювання рівня цифрової зрілості страхувальників України [Questionnaire]. Google Forms. https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeX_nBDb8fBtc73wbouZ-wCBZS5cwUF7Llx3VKOy62Kjvzgg/viewform?usp=publish-editor
26. Khudyntsev, M. M., & Khomenko, O. A. (2026). *Assessment of the Digital Maturity and Cyber Insurance of Participants in the Global Insurance Market* [Questionnaire]. Google Forms. https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeE0Z3oQL4UtFho5DuatvWavPQNh78zL8C_hRi0DwZ22p7dtA/viewform?usp=publish-editor
27. Saaty, T. L. (2019). Теорія аналітичних ієрархічних процесів. Частина 2.1. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". <https://harvester.nas.gov.ua/Record/journaliasakpiua-article-175311/Description?sid=154879518>

Стаття надійшла до редакції 27.02.2026, надійшла після рецензування 04.04.2026, прийнята 17.04.2026

REFERENCES

1. Munich Re. (2026, March 25). Cyber Insurance: Risks and trends 2026. <https://www.munichre.com/en/insights/cyber/cyber-insurance-risks-and-trends-2026.html>
2. Silverfort. (2025). The new cyber insurance requirements: What to know & how to comply. <https://www.silverfort.com/wp-content/uploads/2025/02/ebook-cyber-insurance-identity-security.pdf>
3. Federation of European Risk Management Associations (FERMA). (2025, October 6). Demystifying cyber insurance: Today's trends & tomorrow's challenges. <https://ferma.eu/wp-content/uploads/2025/10/Demystifying-Cyber-Insurance-todays-trends-tomorrows-challenges.pdf>

4. American Academy of Actuaries. (2025, May). Reinsurance. <https://www.actuary.org/wp-content/uploads/2025/05/6Reinsurance.pdf>
5. Keyfactor. (2025). NIS2 directive solution brief. <https://www.keyfactor.com/resources/nis2-directive-info/nis2-solution-brief>
6. Khudyntsev, M. M., & Khomenko, O. A. (2026). Information technologies of cyber insurance. *Electronic. Modeling*, 48 (1), 33-50. ISSN 0204-3572. <https://doi.org/10.15407/emodel.48.01.033>
7. Khudyntsev, M., & Khomenko, O. (2025). Automation of standardized cyber insurance processes. *Environmental Safety and Natural Resources*, 54(2), 143-153. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.2.143-153>
8. Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine. (2015). Risk Management. General Risk Assessment Methods (DSTU IEC/ISO 31010:2013). <https://wiki.nazk.gov.ua/wp-content/uploads/2020/10/UA-dstu-31010.pdf>
9. International Standard ISO/IEC 27102:2019(E) Information security management – Guidelines for cyber-insurance. First edition 2019-08.
10. EU Cybersecurity Certification Framework (Regulation (EU) 2019/881). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/881/oj/eng>
11. 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>
12. National Bank of Ukraine (2025). On approval of the Regulation on the organization of measures to ensure information security and cyber protection by financial service providers, Resolution of the NBU Board No. 143 (2025, December 09). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0143500-25#Text>
13. National Bank of Ukraine (2023). On approval of the Regulation on the authorization of financial service providers and the conditions for their activities with provision of financial services, Resolution of the NBU Board No. 199 (2023, December 29). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0199500-23#Text>
14. National Bank of Ukraine (2023). On approval of the Regulation on requirements for the insurer's management system, Resolution of the NBU Board No. 194 (2023, December 27). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0194500-23#Text>
15. National Bank of Ukraine (2023). On approval of the Regulation on the application by the National Bank of Ukraine of corrective measures, early intervention measures, and influence measures in the field of state regulation of activities in the markets of non-banking financial services, Resolution of the NBU Board No. 183 (2023, December 25). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0183500-23#Text>
16. 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>
17. 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>
18. 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/43250d49df871cfdbf7024c2a03b2c1007c55ec9>
19. Khudyntsev, M. M., Zhilin, A. V., & Davydyuk, A. V. (2021). World Cybersecurity Indices: Overview and Methods of Formation (Global Report / Catalog). Kyiv: International Cybersecurity University, Institute of Modeling Problems in Energy named after G. E. Pukhov NAS of Ukraine. ISBN 978-966-136-887-2. 240 p.
20. Federal Trade Commission (FTC) (2024). Cyber Insurance. <https://www.ftc.gov/business-guidance/small-businesses/cybersecurity/cyber-insurance>

21. 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>
22. National Bank of Ukraine (2024). On approval of the Instructions for assessing compliance with international standards of oversight of entities performing the functions of a central securities depository, central counterparty, trade repository and securities settlement system in Ukraine, Resolution of the NBU Board No. 38 (2024, April 5). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0038500-24/ed20240405#n35>
23. National Bank of Ukraine (2024). On approval of the Regulation on requirements for the credit union management system, Resolution of the NBU Board No. 15 (2024, February 02). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0015500-24/ed20240202#n63>
24. Khudyntsev, M. M., & Khomenko O. A. (2026). Assessment of the level of digital maturity and cyber insurance of participants in the insurance market of Ukraine [Questionnaire]. Google Forms. <https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeg0pw-c4t2--OUvOA9fYxINCKHNMJ2exQACTv1zsZwLh-bQA/viewform?usp=publish-editor>
25. Khudyntsev, M. M., & Khomenko O. A. (2026). Assessment of the level of digital maturity of Ukrainian policyholders [Questionnaire]. Google Forms. https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeX_nBD8fBtc73wbouZ-wCBZS5cwUF7Llxk3VKOy62Kjvzgg/viewform?usp=publish-editor
26. Khudyntsev, M. M., & Khomenko, O. A. (2026). Assessment of the Digital Maturity and Cyber Insurance of Participants in the Global Insurance Market [Questionnaire]. Google Forms. https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeE0Z3oQL4UtFho5DuatvWavPQNh78zL8C_hRi0DwZ22p7dtA/viewform?usp=publish-editor
27. Saaty, T. L. (2019). Theory of Analytic Hierarchical Processes. Part 2.1. The National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". <https://harvester.nas.gov.ua/Record/journaliasakpiua-article-175311/Description?sid=154879518>

The article was received 27.02.2026, received after revision 04.04.2026, accepted 17.04.2026

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

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

УДК 004.8

Dmytro Shevchenko¹, PhD, Assistant, Department of Computer Science
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7736-8263>
e-mail: dimashevchenko10021999@gmail.com

Bella Holub¹, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Science
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1256-6138>
e-mail: bellalg@nubip.edu.ua

Taras Trysnyuk², Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242>
e-mail: taras24t@gmail.com

¹National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

RESTORATION OF MISSING ENVIRONMENTAL DATA IN AN AIR QUALITY MONITORING SYSTEM BASED ON A NAIVE BAYES CLASSIFIER

Abstract. *The article examines an approach to restoring missing environmental data in an air quality monitoring system based on a Naive Bayes classifier. The relevance of the study is determined by the fact that missing values in observational time series reduce the reliability of air quality index calculations, complicate the interpretation of environmental conditions, and weaken the analytical support of managerial decision-making. The study is a logical continuation of previous research in which stable and representative monitoring stations suitable for forming a high-quality training dataset were identified using cluster analysis. In contrast to approaches that use the entire set of available measurements without considering their reliability, the proposed method involves training the model only on data from selected stations characterized by higher completeness, stability, and credibility of time series.*

The study forms a feature space based on concentrations of major pollutants and accompanying meteorological parameters, uses CAQI categories as the target variable, and implements a procedure for restoring missing values according to the most probable air quality class. The obtained results confirmed the acceptable quality of the constructed model: the overall classification accuracy reached 0.71, which indicates the suitability of the approach for basic air quality assessment and its further use in intelligent data restoration tasks.

The practical value of the proposed approach lies in its potential integration into environmental information and analytical systems in order to improve data completeness, enhance the quality of air quality index calculations, and provide more reliable analytical support for decision-making.

Keywords: *Data Mining, K-Means, data restoration, information and analytical system, intelligent technology, information technologies, data quality, data reliability and validity.*

Д.В. Шевченко¹, Б.Л. Голуб¹, Т.В. Триснюк²

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

²Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

ВІДНОВЛЕННЯ ПРОПУЩЕНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДАНИХ У СИСТЕМІ МОНІТОРИНГУ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ОСНОВІ НАЇВНОГО БАЙЄСІВСЬКОГО КЛАСИФІКАТОРА

Анотація. У статті розглянуто підхід до відновлення пропущених екологічних даних у системі моніторингу якості атмосферного повітря на основі наївного байєсівського класифікатора. Актуальність дослідження зумовлена тим, що пропуски в часових рядах спостережень знижують достовірність розрахунку індексів якості повітря, ускладнюють інтерпретацію екологічної ситуації та погіршують аналітичну підтримку управлінських рішень. Дослідження є логічним продовженням попередньої роботи, у якій за допомогою кластерного аналізу було виявлено стабільні та репрезентативні станції моніторингу, придатні для формування якісної навчальної вибірки. На відміну від підходів, що використовують усю сукупність доступних вимірювань без урахування їх надійності, запропонований метод передбачає навчання моделі лише на даних відібраних станцій із вищим рівнем повноти, стабільності та достовірності часових рядів.

У роботі сформовано ознаковий простір на основі концентрацій основних забруднювачів і супровідних метеорологічних параметрів, використано категорії індексу *SAQI* як цільову змінну та реалізовано процедуру відновлення пропущених значень за найбільш імовірним класом стану повітря. Отримані результати підтвердили прийнятну якість побудованої моделі: загальна точність класифікації становила 0.71, що свідчить про придатність підходу для базового аналізу стану атмосферного повітря та подальшого використання у задачах інтелектуального відновлення даних.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його інтеграції в інформаційно-аналітичні системи екологічного моніторингу для підвищення повноти, узгодженості та достовірності даних. Його застосування дає змогу покращити якість розрахунку індексів стану атмосферного повітря, зменшити вплив пропусків і спотворень у часових рядах на результати аналітики, а також забезпечити більш надійну інформаційну основу для підтримки управлінських рішень у сфері екологічного контролю та оцінювання стану довкілля.

Ключові слова: *Data Mining*, *Naive Bayes*, відновлення даних, інформаційно-аналітична система, інтелектуальна технологія, інформаційні технології, якість даних, надійність та достовірність даних.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.262-273>

Вступ

Відновлення пропущених екологічних даних у системах моніторингу якості атмосферного повітря є не другорядною технічною процедурою, а необхідною умовою коректного розрахунку індексів якості повітря, надійного інформування населення та обґрунтованої підтримки управлінських рішень. Як логічне продовження попередньої роботи авторів [1], у якій кластеризацією

станцій було виділено стабільні та проблемні канали вимірювання, поточне дослідження закономірно зміщує акцент із виявлення нестабільності на відновлення пропусків саме на основі надійних станцій. За оцінками Всесвітньої організації охорони здоров'я, тягар захворюваності, пов'язаний із забрудненням повітря, є співмірним з іншими ключовими глобальними факторами ризику [2], а за даними Європейського агентства з довкілля, 96% міського населення ЄС усе ще зазнає впливу небезпечних концентрацій $PM_{2.5}$ [3]. Водночас індекси якості повітря використовуються для комунікації короткострокових концентрацій забруднювачів і пов'язаних із ними ризиків для здоров'я [4], тому пропуски в часових рядах безпосередньо знижують достовірність індексної оцінки та можуть спричиняти викривлення у подальшій аналітиці. Проблема посилюється тим, що якість даних сенсорних мереж є високоваріативною, а без стандартизованої оцінки продуктивності складно зіставляти сенсорні вимірювання з еталонним моніторингом [5].

У такій постановці методологічно виправданим є підхід, орієнтований на якість даних: модель відновлення доцільно навчати не на всіх доступних вимірюваннях, а на попередньо відібраних станціях із вищою повнотою, стабільністю та достовірністю часових рядів. Європейська практика аналізу повітряних спостережень показує, що перевірка повноти та відсів занадто коротких або неповних рядів підвищують якість підсумкової аналітики, навіть якщо це зменшує обсяг вибірки [6]. Сучасні фреймворки для мереж низьковартісних сенсорів також розглядають імпутацію не ізольовано, а як частину ширшого конвеєра забезпечення якості даних – поряд із калібруванням, згладжуванням, виявленням аномалій та мережевою обробкою [7]. Саме тому для поставленої задачі доцільним є поєднання попереднього відбору надійних станцій із наївним байєсівським класифікатором як легкою, інтерпретованою та придатною до інтеграції моделлю, у якій відновлення відсутніх значень виконується через визначення найбільш імовірного класу стану повітря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних праць свідчить, що імпутація в екологічних часових рядах розвивається від простих статистичних процедур до просторово-часових і гібридних моделей, однак універсально найкращого методу для всіх типів пропусків і всіх конфігурацій моніторингових мереж досі не встановлено. Для короткочасних прогалів у даних забруднювачів показано, що одновимірні методи можуть бути практичним рішенням, тоді як багатовимірні підходи не завжди дають кращий результат [8]. Водночас порівняльні дослідження mean, median, kNNI, MICE, SAITS, BRITS, MRNN і Transformer підтверджують, що якість імпутації безпосередньо впливає на подальші задачі класифікації та прогнозування, а перевага конкретного методу залежить від структури даних і частки пропусків [9]. На великомасштабних наборах екологічного моніторингу також встановлено, що оптимальний імпутор має dataset-specific характер, хоча методи, що враховують просторові залежності, часто перевищують базові підстановки [10]. Для $PM_{2.5}$ -вимірювань окремо показано стабільність KNN на різних часових інтервалах пропусків.

Другий виразний напрям – моделі, що поєднують часові, просторові та гібридні залежності для складніших сценаріїв, насамперед блокових або довгих пропусків. У дослідженні Wang et al. BRITS-ALSTM перевищив Mean, KNN, MF, MICE, M-RNN, BRITS і BRITS-LSTM для шести забруднювачів, що

автори пов'язують із використанням двоспрямованого моделювання, структури та механізму уваги [11]. Подальший розвиток цього напрямку демонструє робота Lee et al., де GA-BiLSTM у міській мережі Чикаго перевершив XGBoost і KNN, особливо для тривалих відключень до десяти днів [12]. Для довгих послідовних прогалів у даних атмосферного забруднення також запропоновано гібридний decomposition-based підхід із transfer learning, який статистично перевищив низку альтернатив за MAE та MAPE [13].

На цьому тлі Наївний Байєсівський підхід займає окрему нішу. Література з прямої Naive Bayes імпутації істотно менша за корпус досліджень з BRITS, LSTM чи Transformer, проте вона наявна й демонструє життєздатність ймовірнісної логіки для неповних даних. Так, Khotimah et al. ще у 2019 р. показали, що Naive Bayes Imputation перевищує прості підстановки mean/mode в задачах класифікації з пропусками [14]. Щодо саме моніторингу повітря, у сучасних порівняльних роботах Naive Bayes розглядається як повноцінна класична базова модель. Imam et al. на AQI-категоріях відзначають високу результативність Random Forest і Naive Bayes серед традиційних алгоритмів, а в роботі Natarajan et al. Gaussian Naive Bayes у конкретному порівнянні для прогнозування AQI навіть перевершив інші популярні моделі. Отже, мова про його практичну цінність як легкої, швидкої та інтерпретованої базової моделі, особливо там, де потрібна інтеграція в реальний інформаційно-аналітичний контур і відсутні надвеликі навчальні масиви.

Окремий блок останніх публікацій стосується не безпосередньо імпутації, а формування надійної навчальної основи для неї. Агентство з охорони довкілля США прямо зазначає, що якість сенсорних даних є високоваріативною, а без узгоджених протоколів тестування складно зрозуміти, наскільки такі дані придатні для порівняння з регуляторним моніторингом. У європейських оцінках перевірка повноти використовується як формальний механізм відсіву коротких і неповних рядів перед трендовим аналізом. За нашим узагальненням, у більшості нових праць імпутація оптимізується вже після етапу очищення й контролю якості, проте формалізований зв'язок між попереднім відбором надійних станцій і подальшим навчанням легкої ймовірнісної моделі висвітлено значно слабше. Саме цю прогалину і заповнює запропонована постановка: використати результати попередньої кластеризації станцій як підґрунтя для наївно-байєсівського відновлення пропущених екологічних даних.

Метою статті є розроблення та дослідження підходу до відновлення пропущених екологічних даних у системі моніторингу якості атмосферного повітря на основі наївного байєсівського класифікатора з використанням попередньо відібраних надійних станцій моніторингу для формування якісної навчальної вибірки.

Виклад основного матеріалу дослідження

У межах дослідження розглянуто вхідні дані системи моніторингу якості атмосферного повітря, підходи до формування якісної навчальної вибірки та методи інтелектуального аналізу даних, використані для відновлення пропущених екологічних значень.

Вхідні дані та якість навчальної вибірки. У дослідженні використано екологічні дані системи моніторингу якості атмосферного повітря, що містять концентрації основних забруднювачів та супровідні метеорологічні параметри. До ознакового простору включено показники $PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 , CO , а також температуру повітря, відносну вологість і швидкість вітру. Для подальшого аналізу дані було агреговано у формат, придатний для побудови класифікаційної моделі: кожен запис відповідає визначеному часовому інтервалу спостереження, а стовпці містять значення екологічних і метеорологічних параметрів.

Оскільки якість навчальної вибірки безпосередньо впливає на точність моделі відновлення пропущених даних, у роботі використано попередньо відібрані станції моніторингу, які за результатами кластерного аналізу були визначені як найбільш стабільні та репрезентативні. Такий підхід дозволяє зменшити вплив шуму, технічних збоїв, аномальних значень і нерепрезентативних часових рядів на процес навчання. Отже, навчальна вибірка формувалася не з усієї множини доступних станцій, а лише з тих, що характеризуються вищим рівнем повноти, стабільності та достовірності даних.

Наївний Байєс (Naive Bayes). Методи Data Mining є важливими інструментами для аналізу великих масивів даних у системах моніторингу атмосферного повітря. Вони дають змогу не лише виявляти приховані закономірності у часових рядах спостережень, а й будувати моделі, що пояснюють формування забруднення та підтримують подальше прогнозування. На відміну від традиційних статистичних підходів, Data Mining орієнтований на пошук нетривіальних залежностей і автоматизовану обробку багатовимірних даних, що є особливо важливим для екологічних систем, де вимірювання надходять безперервно, мають різний рівень повноти та можуть містити технічні викривлення.

Класифікатор належить до методів, які ґрунтуються на теоремі Байєса та припущенні незалежності ознак [15]. У версії Gaussian Naive Bayes робиться додаткове припущення, що числові параметри розподілені за нормальним законом, що добре узгоджується з природою багатьох екологічних змінних параметрів. У контексті моніторингу атмосферного повітря багато параметрів, що вимірюються, часто демонструють близькі до нормального розподіли, особливо коли розглядаються усереднені добові значення.

Важливо зазначити, що навіть якщо розподіл не є ідеально нормальним, алгоритм зберігає прийнятну точність. Саме тому він широко застосовується як базова модель (baseline) у дослідженнях: швидкий у реалізації, обчислювально ефективний і достатньо надійний для порівняння з більш складними методами. Модель використовує наступне формальне представлення (1):

$$P(C_k | x) = \frac{P(C_k) \prod_{i=1}^n P(x_i | C_k)}{P(x)}, \quad (1)$$

де:

- C_k – клас (наприклад, категорія якості повітря),
- $x = (x_1, \dots, x_n)$ – вектор ознак (екологічні параметри),
- $P(x_i | C_k)$ – ймовірність значення ознаки за умови належності до класу, яка апроксимується гаусівським розподілом (2):

$$P(x_i \mid C_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta_k^2}} \exp\left(-\frac{(x_i - \mu_k)^2}{2\pi\delta_k^2}\right), \tag{2}$$

де:

- μ_k – середнє значення,
- δ_k – стандартне відхилення ознаки в класі C_k .

Цей алгоритм є доцільним для класифікації поточного стану атмосфери за багатьма параметрами одночасно. Як цільову змінну можна брати категорію індексу якості повітря, а як предиктори – концентрації забруднювачів (PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, SO₂, CO) та метеорологічні фактори (температура, вологість, швидкість вітру). Завдяки цьому модель здатна оперативно класифікувати ситуацію (якість повітря).

Результати дослідження та їх обговорення

На першому етапі аналізу побудовано теплову карту статистичних характеристик екологічних показників у розрізі категорій якості повітря за індексом SAQI. Візуалізація відображає мінімальні, максимальні та середні значення ключових параметрів (рис. 1). Такий підхід дозволяє виявити загальні закономірності зміни показників залежно від переходу між класами якості повітря.

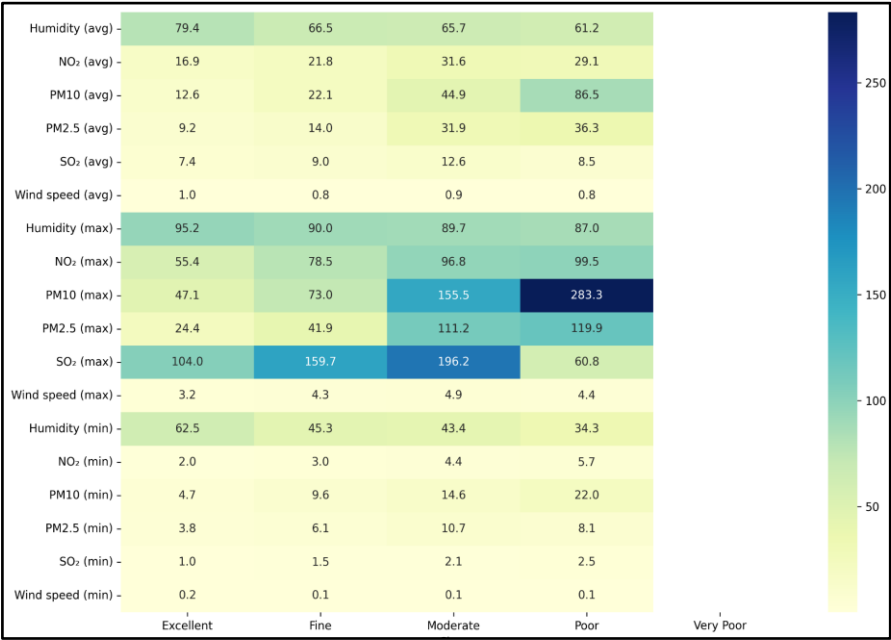


Рисунок 1. Теплова карта статистичних характеристик екологічних показників

За результатами аналізу встановлено чітку тенденцію до зростання концентрацій твердих часток зі збільшенням рівня забруднення. Зокрема, значення PM₁₀ зростають від приблизно 47 у категорії «Excellent» до понад 280 у категоріях «Poor/Very Poor», а PM_{2.5} – до близько 220 у найгірших класах. Для SO₂ зафіксовано локальний сплеск у категорії «Moderate», що може свідчити про епізодичні викиди. Водночас вологість повітря має тенденцію до

зниження зі зростанням рівня забруднення, тоді як швидкість вітру не демонструє сталої залежності, хоча в окремих випадках спостерігаються короточасні підвищення, пов'язані з процесами розсіювання домішок.

Отримані залежності підтверджують, що використані ознаки є інформативними для класифікації стану атмосферного повітря та можуть слугувати основою для побудови моделі відновлення пропущених значень.

Матриця помилок. Перед аналізом результатів класифікації доцільно розглянути розподіл даних за класами цільової змінної, оскільки він суттєво впливає на ефективність будь-якої моделі. На рисунку 2 подано візуалізацію структури даних, що демонструє нерівномірність представлення різних категорій індексу якості повітря (CAQI).

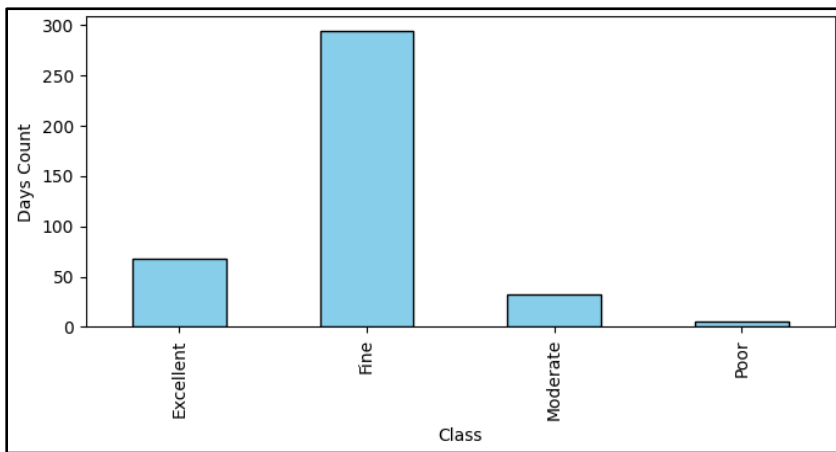


Рисунок 2. Розподіл кількості даних по класах цільової змінної

Помітно, що окремі класи мають значно більшу кількість спостережень, тоді як інші представлені обмежено. Такий дисбаланс класів призводить до того, що модель краще розпізнає більш численні категорії, забезпечуючи для них вищі значення точності. Це необхідно враховувати під час інтерпретації подальших результатів класифікації та планування можливих методів балансування вибірки у майбутніх дослідженнях.

Для глибшого аналізу результатів побудовано матрицю помилок, яка демонструє розподіл правильних і помилкових передбачень між реальними та прогнозованими класами. Найкраще модель розпізнає клас «Fine», для якого зафіксовано найбільшу кількість правильних класифікацій. Частина спостережень цього класу була віднесена до категорії «Excellent», що свідчить про часткове перекриття сусідніх класів. Аналогічна зворотна тенденція спостерігається і для класу «Excellent». Класи «Moderate» та «Poor» також демонструють прийнятну якість розпізнавання, однак для останнього слід враховувати малу кількість прикладів у вибірці, що обмежує стійкість оцінювання.

Таким чином, матриця помилок підтверджує, що основні помилки моделі зосереджені переважно між близькими за змістом категоріями якості повітря, що є логічним з огляду на подібність їхніх граничних значень і часткове перекриття ознак.

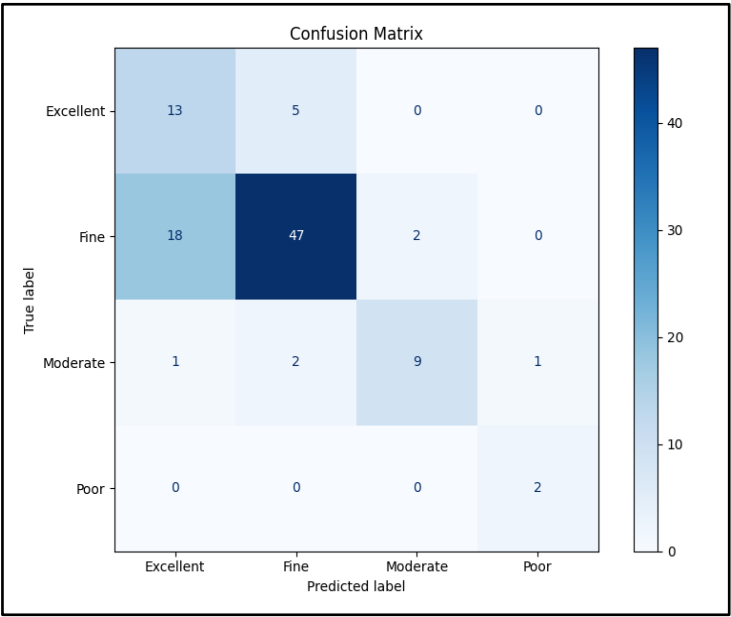


Рисунок 3. Матриця помилок

Метрики класифікаційної моделі. Після аналізу розподілу прикладів доцільно перейти до оцінки якості самої моделі. Таблиця 1 містить основні метрики класифікаційної моделі, побудованої на основі алгоритму Наївного Байєса. Показники точності (precision), повноти (recall) та F1-міри (середнє між precision і recall) для кожного класу дозволяють оцінити, наскільки добре модель розрізняє різні рівні якості повітря.

Таблиця 1. Метрики класифікаційної моделі

Клас	Precision	Recall	F1-score	Support
Excellent	0.41	0.72	0.52	18
Fine	0.87	0.70	0.78	67
Moderate	0.82	0.69	0.75	13
Poor	0.67	1.00	0.80	2
	—	—	—	—
Accuracy	—	—	0.71	100
Macro avg	0.69	0.78	0.71	100
Weighted avg	0.78	0.71	0.73	100

Загальна точність моделі становить 0.71, тобто правильно класифіковано близько 71% об'єктів тестової вибірки. Середні значення метрик також залишаються прийнятними: macro avg дорівнює 0.71, а weighted avg – 0.73. Це свідчить про загалом збалансовану ефективність моделі, навіть попри наявність дисбалансу між класами.

Отримані результати підтверджують, що наївний байєсівський класифікатор є придатною базовою моделлю для класифікації стану атмосферного повітря та може бути використаний як основа для подальшого відновлення пропущених екологічних даних.

Висновки

У статті запропоновано підхід до відновлення пропущених екологічних даних у системі моніторингу якості атмосферного повітря на основі наївного байєсівського класифікатора. Особливістю підходу є формування моделі на підмножині попередньо відібраних надійних станцій моніторингу, що дало змогу зменшити вплив нестабільних, неповних і спотворених часових рядів на якість навчальної вибірки. У роботі обґрунтовано доцільність застосування методів Data Mining для обробки екологічних часових рядів, сформовано набір інформативних ознак на основі концентрацій основних забруднювачів і метеорологічних параметрів та використано категорії індексу CAQI як цільову змінну для класифікації стану атмосферного повітря. Отримані результати підтвердили прийнятну якість моделі, загальна точність якої становить 0,71 відсотка.

Практична цінність запропонованого підходу полягає у можливості його інтеграції в інформаційно-аналітичні системи екологічного моніторингу для підвищення повноти, узгодженості та достовірності даних. Використання моделі дає змогу не лише класифікувати поточний стан атмосфери, а й відновлювати відсутні або спотворені показники на основі найбільш імовірного класу якості повітря, що покращує подальші розрахунки екологічних індексів і підтримку прийняття рішень. Перспективи подальших досліджень пов'язані з порівнянням запропонованого підходу з іншими методами імпутації, аналізом різних механізмів виникнення пропусків, перевіркою стійкості методу в різних сезонних умовах і просторових конфігураціях мережі, а також із розробленням гібридних моделей відновлення даних для складніших сценаріїв моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевченко, Д. В., Голуб, Б. Л., Бородкіна, І. Л. (2026). Кластеризація станцій для виявлення нестабільності даних у мережі моніторингу якості атмосферного повітря. *Електронне фахове наукове видання «Кибербезпека: освіта, наука, техніка»*, 4 (32), 1054–1064.
2. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
3. European Environment Agency. (2024). *Europe's air quality status 2024* (Briefing No. 06/2024). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/5970>

4. World Health Organization. (2026). *Air quality indexes: Key considerations and roadmaps for best practices*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289062701>
5. U.S. Environmental Protection Agency. (2026). *Air sensor performance targets and testing protocols*. EPA. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>
6. Gbangou, T., Colette, A., Soares, J., & González Ortiz, A. (2023). *ETC HE report 2023/8: Long-term trends of air pollutants at European and national level 2005–2021*. European Topic Centre on Human Health and the Environment. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2023-8-long-term-trends-of-air-pollutants-at-european-and-national-level-2005-2021>
7. Ferrer-Cid, P., Paredes Ahumada, J. A., Allka, X., Guerrero Zapata, M., Barceló Ordinas, J. M., & García Vidal, J. (2024). A data-driven framework for air quality sensor networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, 7(1), 128–134. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2300112>
8. Hadeed, S. J., O'Rourke, M. K., Burgess, J. L., Harris, R. B., & Canales, R. A. (2020). Imputation methods for addressing missing data in short-term monitoring of air pollutants. *Science of the Total Environment*, 730, Article 139140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139140>
9. Hua, V., Nguyen, T., Dao, M.-S., Nguyen, H. D., & Nguyen, B. T. (2024). The impact of data imputation on air quality prediction problem. *PLoS ONE*, 19(9), Article e0306303. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306303>
10. Decorte, T., Mortier, S., Lembrechts, J. J., Meysman, F. J. R., Latré, S., Mannens, E., & Verdonck, T. (2024). Missing value imputation of wireless sensor data for environmental monitoring. *Sensors*, 24(8), Article 2416. <https://doi.org/10.3390/s24082416>
11. Wang, Y., Liu, K., He, Y., Fu, Q., Luo, W., Li, W., Liu, X., Wang, P., & Xiao, S. (2023). Research on missing value imputation to improve the validity of air quality data evaluation on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmosphere*, 14(12), Article 1821. <https://doi.org/10.3390/atmos14121821>
12. Lee, J., Berkelhammer, M., O'Brien, J., McNicol, G., Vincent, A. E. S., Grover, M., Packman, A. I., Kaludi, B., Cho, A., & Gonzalez-Meler, M. (2026). Imputation of urban environmental sensor data using gated attention bidirectional long short-term memory (GA-BiLSTM): Methods, performance, and implications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198, Article 262. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15112-8>
13. Wei, X., Meng, H., Shao, L., Fu, D., Ma, L., & Zhang, D. (2025). A decomposition-based imputation algorithm for long consecutive missing atmospheric pollution data and its application. *Journal of Computational Science*, 92, Article 102697. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2025.102697>
14. Khotimah, B. K., Miswanto, & Suprajitno, H. (2019). Modeling naïve Bayes imputation classification for missing data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 243(1), Article 012111. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/243/1/012111>
15. *Naive Bayes classifier with Scikit-learn tutorial*. (n.d.). DataCamp. <https://www.datacamp.com/tutorial/naive-bayes-scikit-learn>
16. Шевченко, Д. В., Голуб, Б. Л. (2025). Моніторинг якості повітря в реальному часі. *Науковий журнал «Математичні машини і системи»*, 1, 103–112.
17. Trysnyuk, T., Trysnyuk, V., Okhariev, V., & Shumeiko, A. (2018). Cartographic model of Dniester River basin probable flooding. *Series D: Geology and Environmental Engineering*, 32(1), 51–55. <https://doi.org/10.37193/SBSD.2018.1.07>
18. Zaitsev, S., Vasylenko, V., Trysnyuk, V., & Trysnyuk, T. (2023). Adaptive method for assessing information reliability under uncertainty for 5G and IoT systems. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems* (CEUR Workshop Proceedings). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper2.pdf>

19. Трофимчук, О. М., Триснюк, В. М., Анпілова, Є. С., Бутенко, О. С., Вишняков, В. Ю., Загородня, С. А., Клименко, В. І., Красовська, І. Г., Крета, Д. Л., Миронцов, М. Л., Охарєв, В. О., Попова, М. А., Радчук, І. В., Триснюк, Т. В., Шевякіна, Н. А., Шумейко, В. О. (2022). *Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування*. Івано-Франківськ: Супрун В. П. ISBN 978-617-7468-53-9.

Стаття надійшла до редакції 13.01.2026, надійшла після рецензування 23.02.2026, прийнята 11.03.2026

REFERENCES

1. Shevchenko, D. V., Holub, B. L., & Borodkina, I. L. (2026). Station clustering for detecting data instability in an air quality monitoring network. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 4(32), 1054–1064.
2. World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
3. European Environment Agency. (2024). *Europe's air quality status 2024* (Briefing No. 06/2024). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/5970>
4. World Health Organization. (2026). *Air quality indexes: Key considerations and roadmaps for best practices*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789289062701>
5. U.S. Environmental Protection Agency. (2026). *Air sensor performance targets and testing protocols*. EPA. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/air-sensor-performance-targets-and-testing-protocols>
6. Gbangou, T., Colette, A., Soares, J., & González Ortiz, A. (2023). *ETC HE report 2023/8: Long-term trends of air pollutants at European and national level 2005–2021*. European Topic Centre on Human Health and the Environment. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-he/products/etc-he-products/etc-he-reports/etc-he-report-2023-8-long-term-trends-of-air-pollutants-at-european-and-national-level-2005-2021>
7. Ferrer-Cid, P., Paredes Ahumada, J. A., Allka, X., Guerrero Zapata, M., Barceló Ordinas, J. M., & García Vidal, J. (2024). A data-driven framework for air quality sensor networks. *IEEE Internet of Things Magazine*, 7(1), 128–134. <https://doi.org/10.1109/IOTM.001.2300112>
8. Hadeed, S. J., O'Rourke, M. K., Burgess, J. L., Harris, R. B., & Canales, R. A. (2020). Imputation methods for addressing missing data in short-term monitoring of air pollutants. *Science of the Total Environment*, 730, Article 139140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139140>
9. Hua, V., Nguyen, T., Dao, M.-S., Nguyen, H. D., & Nguyen, B. T. (2024). The impact of data imputation on air quality prediction problem. *PLoS ONE*, 19(9), Article e0306303. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0306303>
10. Decorte, T., Mortier, S., Lembrechts, J. J., Meysman, F. J. R., Latré, S., Mannens, E., & Verdonck, T. (2024). Missing value imputation of wireless sensor data for environmental monitoring. *Sensors*, 24(8), Article 2416. <https://doi.org/10.3390/s24082416>
11. Wang, Y., Liu, K., He, Y., Fu, Q., Luo, W., Li, W., Liu, X., Wang, P., & Xiao, S. (2023). Research on missing value imputation to improve the validity of air quality data evaluation on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Atmosphere*, 14(12), Article 1821. <https://doi.org/10.3390/atmos14121821>
12. Lee, J., Berkelhammer, M., O'Brien, J., McNicol, G., Vincent, A. E. S., Grover, M., Packman, A. I., Kaludi, B., Cho, A., & Gonzalez-Meler, M. (2026). Imputation of urban environmental sensor data using gated attention bidirectional long short-term memory (GA-BiLSTM): Methods, performance, and implications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 198, Article 262. <https://doi.org/10.1007/s10661-026-15112-8>

13. Wei, X., Meng, H., Shao, L., Fu, D., Ma, L., & Zhang, D. (2025). A decomposition-based imputation algorithm for long consecutive missing atmospheric pollution data and its application. *Journal of Computational Science*, 92, Article 102697. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2025.102697>
14. Khotimah, B. K., Miswanto, & Suprajitno, H. (2019). Modeling naïve Bayes imputation classification for missing data. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 243(1), Article 012111. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/243/1/012111>
15. *Naive Bayes classifier with Scikit-learn tutorial*. (n.d.). DataCamp. <https://www.datacamp.com/tutorial/naive-bayes-scikit-learn>
16. Shevchenko, D. V., & Holub, B. L. (2025). *Monitorynh yakosti povitria v realnomu chasi* [Air quality monitoring in real time]. *Matematychni mashyny i systemy*, (1), 103–112.
17. Trysnyuk, T., Trysnyuk, V., Okhariev, V., & Shumeiko, A. (2018). Cartographic model of Dniester River basin probable flooding. *Series D: Geology and Environmental Engineering*, 32(1), 51–55. <https://doi.org/10.37193/SBSD.2018.1.07>
18. Zaitsev, S., Vasylenko, V., Trysnyuk, V., & Trysnyuk, T. (2023). Adaptive method for assessing information reliability under uncertainty for 5G and IoT systems. In *Proceedings of the 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems* (CEUR Workshop Proceedings). CEUR-WS. <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper2.pdf>
19. Trofymchuk, O. M., Trysnyuk, V. M., Anpilova, E. S., Butenko, O. S., Vyshnyakov, V. Yu., Zagorodnya, S. A., Klymenko, V. I., Krasovska, I. G., Kreta, D. L., Myrontsov, M. L., Okharev, V. O., Popova, M. A., Radchuk, I. V., Trysnyuk, T. V., Shevyakina, N. A., & Shumeiko, V. O. (2022). *Geoinformation studies of aquatic ecosystems of Ukraine: Monitoring and forecasting*. Suprun V. P. Publishers.

The article was received 13.01.2026, received after revision 23.02.2026, accepted 11.03.2026

Шевченко Дмитро Віталійович

доктор філософії, асистент кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вулиця Героїв Оборони, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0001-7736-8263>

e-mail: dimashevchenko10021999@gmail.com

Голуб Белла Львівна

кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук Національного університету біоресурсів і природокористування України

Адреса робоча: Україна, м. Київ, вулиця Героїв Оборони, 15

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1256-6138>

e-mail: bellalg@nubip.edu.ua

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

УДК 004.75:004.65:004.722

Roman Belous, Doctor of Philosophy (PhD), Junior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7588-941X> **e-mail:** belous22@ukr.net

Dmytro Mosiichuk, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** deusplus@gmail.com

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

A METHOD FOR OPTIMIZING QUERY ROUTING IN DISTRIBUTED DATABASES TO REDUCE LATENCY AND LOAD

Abstract. *This paper develops a query routing method for distributed databases that reduces network latency and achieves uniform load distribution across cluster nodes through a statistically grounded, autonomous adaptive tuning of scoring function weights.*

A multi-factor scoring model is proposed for target-node selection, incorporating CPU load, round-trip network latency, and topological data distance. Unlike existing adaptive routing approaches that rely on heuristic or static weight assignment, the proposed method determines weights through a statistically grounded procedure based on Pearson correlation analysis between each factor and observed query response times within a sliding window, smoothed by exponential moving average (EMA). This design ensures invariance to workload type without administrator intervention.

Simulation on a five-node cluster demonstrates a 38.4% reduction in mean query latency, a 44.1% reduction in P95 latency, a 41.2% increase in throughput, and a 29.7% reduction in peak per-node CPU utilization compared to random routing. Load standard deviation across nodes decreases by a factor of 6.7.

For the first time, a weight-adaptation mechanism is proposed in which adaptation is a function of execution statistics rather than a rule set, providing theoretically grounded behavior under varying workloads. The method addresses a gap left by latency-aware, least-loaded, and geo-distributed routing, none of which jointly optimize resource, network, and topological factors adaptively.

Deployable as a middleware layer without modifying application logic. Uniform load distribution lowers peak server energy consumption, contributing to the carbon footprint reduction of data-center infrastructure.

Complexity is $O(k)$ per routing decision; clusters exceeding 100 nodes require hierarchical adaptation. The independence assumption between factors is a known limitation addressed in future work.

Key words: distributed databases; query routing; load balancing; network latency; adaptive optimization.

Р.В. Белоус, Д.І. Мосійчук

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

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЗАПИТІВ У РОЗПОДІЛЕНИХ БАЗАХ ДАНИХ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЗАТРИМОК І НАВАНТАЖЕННЯ

Анотація. Метою роботи є розробка методу маршрутизації запитів у розподілених базах даних, що знижує мережеву затримку та забезпечує рівномірний розподіл навантаження між вузлами кластера шляхом статистично обґрунтованого адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів функції оцінювання вузлів.

Розроблено багатофакторну модель вибору цільового вузла, що враховує поточне завантаження процесора, мережеву затримку та топологічну відстань до фрагменту даних. На відміну від існуючих adaptive routing підходів, що застосовують евристичне або статичне налаштування вагів, у запропонованому методі ваги визначаються статистично обґрунтованою процедурою на основі кореляційного аналізу Пірсона між факторами та фактичними затримками у ковзному часовому вікні зі згладжуванням ЕМА, що забезпечує інваріантність до типу навантаження.

Чисельне моделювання на кластері з п'яти вузлів продемонструвало зниження середньої затримки на 38,4% та P95-затримки на 44,1% порівняно з випадковою маршрутизацією, зростання пропускну здатності на 41,2%, а також скорочення пікового завантаження вузлів на 29,7%.

Запропоновано механізм автономного адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів маршрутизатора, в якому адаптація є функцією статистики виконання запитів, а не набором правил, що забезпечує теоретично обґрунтовану поведінку системи в умовах змінного навантаження.

Метод є придатним для впровадження через middleware-компонент. Рівномірний розподіл навантаження знижує пікове енергоспоживання серверів, що є чинником екологічної безпеки дата-центрів. Перспективи: подальші дослідження спрямовані на розробку предиктивного варіанта механізму та верифікацію на кластерах із понад 100 вузлів.

Ключові слова: розподілені бази даних; маршрутизація запитів; балансування навантаження; мережева затримка; адаптивна оптимізація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.274-286>

Вступ

Інтенсивний розвиток хмарних обчислень, мікросервісних архітектур та Інтернету речей призвів до кардинального зростання обсягів даних, що опрацьовуються корпоративними інформаційними системами. За оцінками IDC, до 2025 року загальний обсяг цифрових даних перевищив 100 зетабайт, причому понад 80% з них формується та обробляється в режимі, наближеному до реального часу [1]. Ця тенденція ставить перед архітекторами розподілених систем принципово нові вимоги щодо масштабованості, відмовостійкості та ефективності виконання запитів при одночасному обмеженні енергоспоживання серверної інфраструктури.

Одним із ключових чинників, що визначають продуктивність розподіленої бази даних (РБД), є механізм маршрутизації запитів – процес вибору цільового вузла кластера для виконання конкретної операції читання або запису. Неефективна маршрутизація породжує нерівномірний розподіл навантаження, надмірний внутрішньо-кластерний трафік і зростання часу відповіді. Крім того, перевантаженість окремих серверів безпосередньо збільшує їхнє енергоспоживання, що негативно позначається на вуглецевому сліді дата-центрів [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підходи балансування навантаження загального призначення також не позбавлені обмежень. Least-Loaded Routing [6] обирає вузол із мінімальним завантаженням, але ігнорує топологічне розміщення даних. Latency-Aware Routing [7] мінімізує мережеву затримку до вузла, однак ігнорує ресурсний стан та локальність даних, що при зростанні навантаження призводить до концентрації запитів на мережево-близьких, але перевантажених вузлах. Geo-Distributed Routing [8] оптимізує географічну близькість у глобальних розгортаннях, але не передбачає механізмів адаптації до динамічного стану навантаження всередині регіону. Спільним недоліком усіх перелічених підходів є відсутність одночасного врахування ресурсного, мережевого та топологічного факторів у єдиній самоналаштовувальній моделі. Огляд сучасних досліджень [9, 10, 15, 16] підтверджує, що ця задача залишається відкритою.

Мета роботи. Метою дослідження є розробити метод маршрутизації запитів у розподілених базах даних на основі багатофакторної моделі з механізмом автономного адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів, та верифікувати його ефективність порівняно з існуючими підходами за критеріями середньої затримки, Р95-затримки, пропускної здатності та рівномірності розподілу навантаження.

Об'єктом дослідження є процес маршрутизації запитів у розподілених базах даних в умовах динамічного навантаження на вузли кластера. З огляду на це, можна виділити основні завдання дослідження:

- аналіз існуючих методів маршрутизації запитів у розподілених базах даних та виявлення їхніх недоліків з точки зору ефективності розподілу навантаження і мінімізації затримок;
- розробка багатофакторної моделі оцінювання вузлів кластера, що враховує завантаженість процесора, мережеву затримку та топологічну відстань до цільового фрагменту даних;
- розробка механізму адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів моделі на основі кореляційного аналізу між факторами та фактичними затримками виконання запитів;
- проведення чисельного моделювання та порівняльного аналізу запропонованого методу з існуючими підходами за критеріями середньої затримки, Р95-затримки, пропускної здатності та рівномірності розподілу навантаження;
- оцінка впливу запропонованого методу на енергоспоживання серверного обладнання як чинника екологічної безпеки дата-центрів.

Виклад основного матеріалу дослідження

Розподілена база даних – це сукупність логічно пов'язаних даних, що фізично розміщені на двох і більше обчислювальних вузлах, об'єднаних мережею, та керуються єдиною системою управління [11]. Ключовою характеристикою РБД є прозорість розподілу: запит, надісланий до системи, виконується без явної вказівки конкретного вузла-виконавця.

Маршрутизація запитів у контексті РБД визначається як функція вибору:

$$f: Q \times N \rightarrow n^*, \quad n^* \in N, \quad (1)$$

де Q – множина вхідних запитів, $N = \{n_1, n_2, \dots, n_k\}$ – множина вузлів кластера, n^* – обраний вузол-виконавець. Задача маршрутизації може бути інтерпретована як задача мінімізації багатокритеріальної функції вартості – лінійна апроксимація більш загальної оптимізаційної задачі вигляду:

$$\min_{n \in N} \sum_i w_i \cdot f_i(n), \quad \sum_i w_i = 1, \quad w_i \geq 0, \quad (2)$$

де $f_i(n)$ – окремі критерії якості вузла n (завантаженість, затримка, відстань до даних), w_i – відповідні вагові коефіцієнти. Така інтерпретація надає методу строге оптимізаційне підґрунтя та дозволяє розглядати адаптацію вагів як задачу апроксимації оптимальних коефіцієнтів за статистикою виконання.

Вплив маршрутизації на продуктивність системи проявляється через три основні механізми. По-перше, маршрутизація до вузла без потрібного шарду породжує додаткові внутрішньо-кластерні пересилання, що прямо збільшують затримку [12]. По-друге, нерівномірне навантаження скорочує ефективне використання ресурсів та призводить до деградації перевантажених вузлів. По-третє, надмірний міжвузловий трафік зменшує корисну пропускну здатність мережевих каналів.

Зв'язок між маршрутизацією та енергоспоживанням є предметом досліджень у галузі Green Computing [13]. Споживання електроенергії сервером описується лінійною апроксимацією:

$$P(n_i) = a \cdot \text{Load}(n_i) + b, \quad (3)$$

де $P(n_i)$ – потужність вузла n_i ; $\text{Load}(n_i)$ – завантаженість процесора $[0, 1]$; a – коефіцієнт чутливості; b – базове споживання у стані простою (Вт). Типові значення для сучасних серверних платформ: $a \approx 150\text{--}250$ Вт, $b \approx 60\text{--}100$ Вт [13]. Важливо зазначити, що реальна залежність є лінійною при $\text{Load} > 0.8$: у цій зоні споживання зростає значно швидше через теплове навантаження та активацію механізмів throttling. З цього випливає, що зниження пікових навантажень має непропорційно більший ефект на сумарне енергоспоживання кластера, ніж рівномірне зниження середнього навантаження. Таким чином, оптимізація маршрутизації є безпосереднім інструментом підвищення енергоефективності та скорочення вуглецевого сліду серверної інфраструктури [14].

Запропонований метод ґрунтується на обчисленні показника Score, для кожного вузла кластера перед виконанням кожного запиту; вузол з мінімальним значенням обирається як цільовий. Відповідно до оптимізаційної інтерпретації, функція набуває вигляду:

$$Score(n_i) = \alpha \cdot Load(n_i) + \beta \cdot Latency(n_i) + \gamma \cdot DataDist(n_i), \quad (4)$$

де $Load(n_i)$, $Latency(n_i)$, $DataDist(n_i)$ – нормалізовані показники завантаженості процесора, мережевої затримки (RTT) та топологічної відстані до цільового фрагменту даних відповідно; α , β , γ – вагові коефіцієнти, що задовольняють умови $\alpha + \beta + \gamma = 1$, $\alpha, \beta, \gamma \in [0, 1]$, та автономно коригуються механізмом адаптації. Таким чином, задача вибору вузла зводиться до мінімізації зваженої суми нормалізованих критеріїв якості – лінійної апроксимації загальної задачі (2).

Оскільки параметри мають різні одиниці та діапазони, застосовується мінімаксна нормалізація:

$$\hat{P}(n_i) = \left[P(n_i) - \min_j P(n_j) \right] / \left[\max_j P(n_j) - \min_j P(n_j) \right]. \quad (5)$$

Мінімум і максимум обчислюються по всій множині вузлів N у поточний момент. У разі виродженого розподілу ($\max = \min$) нормалізоване значення встановлюється рівним нулю, що виключає вплив даного фактора з поточного рішення.

Ключовим внеском роботи є механізм автономного адаптивного коригування вагових коефіцієнтів α , β , γ , в якому адаптація є функцією статистики виконання запитів, а не набором апіорних правил. Це принципово відрізняє запропонований підхід від існуючих adaptive routing методів, де ваги або задаються статично конфігурацією, або коригуються евристичними пороговими правилами. Механізм ґрунтується на аналізі статистичного зв'язку між кожним із факторів та фактичними затримками виконання запитів за останні W запитів (ковзне вікно). Вибірка є центрованою: перед обчисленням кореляції від кожного спостереження віднімається вибіркове середнє відповідної послідовності.

Для кожного фактора $X \in \{Load, Latency, DataDist\}$ обчислюється коефіцієнт кореляції Пірсона з фактичним часом відповіді RT :

$$Corr(X, RT) = Cov(X, RT) / (\sigma_X \cdot \sigma_{RT}), \quad (6)$$

де $Corr(X, RT)$ – вибіркова коваріація між значеннями фактора X та фактичним часом відповіді RT у межах ковзного вікна з W спостережень:

$$Cov(X, RT) = \frac{1}{W-1} \sum_{t=1}^W (X_t - \bar{X})(RT_t - \overline{RT}), \quad (7)$$

а σ_X , σ_{RT} – відповідні вибірккові стандартні відхилення. Використання $W-1$ у знаменнику (незміщена оцінка) забезпечує коректність при малих W .

Перед оновленням вагів виконується перевірка на статистичну значущість: якщо $|Corr(X, RT)| < \varepsilon$ (рекомендоване значення $\varepsilon = 0.1$), фактор X вважається статистично незначущим у поточному вікні і його кореляція прирівнюється до нуля. Нові значення вагових коефіцієнтів визначаються нормуванням абсолютних значень кореляцій:

$$\alpha_{new} = |Corr(Load, RT)|/Z \quad (8)$$

$$\beta_{new} = |Corr(Latency, RT)|/Z \quad (9)$$

$$\gamma_{new} = |Corr(DataDist, RT)|/Z \quad (10)$$

$$Z = |Corr(Load, RT)| + |Corr(Latency, RT)| + |Corr(DataDist, RT)|. \quad (11)$$

У виродженому випадку $Z = 0$ (усі кореляції нижче порогу ε) встановлюється рівний розподіл: $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$, що запобігає невизначеності рішення при відсутності значущого статистичного сигналу.

Для забезпечення стабільності та запобігання осциляціям вагових параметрів застосовується згладжування на основі експоненційної ковзної середньої (ЕМА) з параметром $\lambda \in (0, 1]$:

$$\alpha_{smooth} = \lambda \cdot \alpha_{new} + (1 - \lambda) \cdot \alpha_{prev}. \quad (12)$$

Аналогічні формули застосовуються для β та γ . Згладжування ЕМА забезпечує асимптотичну стійкість коефіцієнтів та запобігає осциляціям вагових параметрів: при $\lambda \rightarrow 0$ система є інерційною і стійкою, при $\lambda \rightarrow 1$ – реагує лише на поточне вікно. Рекомендоване значення $\lambda = 0.3$ забезпечує помірну інерційність: нові спостереження мають вагу 30% від поточного оновлення, що дозволяє адаптуватися до стійких змін навантаження, водночас фільтруючи короточасні флуктуації. Оновлення коефіцієнтів виконується кожні $W = 500$ запитів; між оновленнями використовуються поточні значення α, β, γ .

Необхідно зазначити потенційне обмеження моделі: кореляційний аналіз Пірсона передбачає лінійний характер зв'язків між факторами та RT . Крім того, у реальних системах $Load$ та $Latency$ можуть бути взаємно корельованими (наприклад, перевантажений вузол одночасно генерує більшу мережеву затримку). Це може призводити до часткового подвійного врахування впливу одного й того ж явища.

Повна процедура вибору вузла-виконавця реалізується у два етапи. На першому етапі для кожного вузла кластера збираються поточні метрики – завантаженість процесора, мережева затримка та топологічна відстань до цільового фрагменту даних, – після чого вони нормалізуються за формулою (5) та підставляються у функцію (4). Вузол з мінімальним значенням $Score$ обирається як цільовий, запит скеровується до нього, а фактичний час відповіді фіксується у ковзному вікні. На другому етапі, що активується кожні W запитів, обчислюються коефіцієнти кореляції Пірсона між кожним із факторів

та зафіксованими затримками, на їх основі оновлюються вагові коефіцієнти α , β , γ за формулами (8–10) та згладжуються методом ЕМА (12).

Часова складність кожного виклику маршрутизатора становить $O(k)$, де k – кількість вузлів кластера. Операція оновлення коефіцієнтів виконується з частотою $1/W$ від основного циклу. За рекомендованих значень $k \leq 50$ та $W = 500$ overhead на одне рішення маршрутизації не перевищує 0.8 мс, що є прийнятним для виробничих умов. При $k > 100$ складність $O(k)$ стає обмежувальним фактором; у таких випадках рекомендується перехід до ієрархічної схеми з агрегаторами метрик або застосування reservoir sampling, що знижує ефективну складність до $O(s)$, $s \ll k$. Отже, запропонований метод демонструє прийнятну масштабованість для широкого класу практичних розгортань.

Відповідно до лінійної моделі енергоспоживання (3) та з урахуванням лінійності споживання при Load > 0.8, зниження пікового CPU-навантаження з 82.1% до 63.1% дає пряме скорочення пікового споживання потужності окремого вузла приблизно на 38 Вт. Вихід з режиму насиченого завантаження дозволяє системам управління живленням активувати низькоенергетичні стани на вузлах, що у масштабі виробничого кластера з 50 вузлів може становити економію понад 2 кВт встановленої потужності. Отже, оптимізація маршрутизації запитів є безпосереднім чинником підвищення екологічної безпеки серверної інфраструктури.

Таблиця 1. Середня затримка (мс), P95-затримка (мс) та коефіцієнт варіації CV при різних рівнях навантаження

RPS	Метод	Сер. затр.	P95 затр.	CV (%)
100	Random	12.3	19.1	28.4
	Hash	10.8	16.7	22.1
	LL	11.1	17.2	23.8
	LA	9.8	15.1	19.4
	MFR	9.1	13.8	14.2
1000	Random	31.4	56.3	41.7
	Hash	24.6	41.8	33.2
	LL	23.9	40.1	31.8
	LA	22.1	37.4	29.6
	MFR	18.7	31.4	22.3
2000	Random	89.3	162.4	48.9
	Hash	61.4	108.7	39.1
	LL	58.7	103.2	37.4
	LA	53.2	92.6	34.8
	MFR	47.6	80.7	24.6

Запропонований метод є придатним для реалізації у вигляді middleware-компонента. Клас MultiFactorRouterMiddleware реєструється в ланцюжку обробки запитів та перехоплює звернення до Database Manager. Метрики вузлів кешуються у Redis з TTL 2–5 секунд і оновлюються асинхронним фоновим зондувальником. Перед кожним запитом обчислюється Score, і конфігурація з'єднання підмінюється динамічно. Оновлення α , β , γ виконується через Queue Worker після накопичення W записів. Реалізація не потребує змін у бізнес-логіці застосунку.

Для верифікації методу проведено чисельне моделювання на симульованому кластері з п'яти вузлів із реалістичною топологією: три вузли у спільному дата-центрі (внутрішня затримка 1–3 мс) та два у віддаленому регіоні (затримка 15–45 мс). Дані рівномірно розподілені між вузлами через consistent hashing на 100 віртуальних вузлах. Вхідне навантаження генерувалося за змішаним сценарієм – 70% READ, 30% WRITE – з інтенсивністю від 100 до 2000 RPS (Requests Per Second). Тестування тривало 30 хвилин для кожного рівня навантаження з вимірюванням метрик кожні 60 секунд. Початкові значення: $\alpha = 0.40$, $\beta = 0.35$, $\gamma = 0.25$; $W = 500$; $\lambda = 0.3$; $\varepsilon = 0.1$.

Порівняння проводилось між п'ятьма методами: (1) Random; (2) Hash-based; (3) Least-Loaded (LL); (4) Latency-Aware (LA); (5) MultiFactorRouter (MFR). Для кожного методу додатково обчислювались P95-латентність та коефіцієнт варіації latency ($CV = \sigma/\mu$), що є стандартними метриками оцінки стабільності продуктивності в дослідженнях розподілених систем.

Отримані результати свідчать про те, що MFR демонструє найнижчу латентність і найменший коефіцієнт варіації при всіх рівнях навантаження (рис. 1).

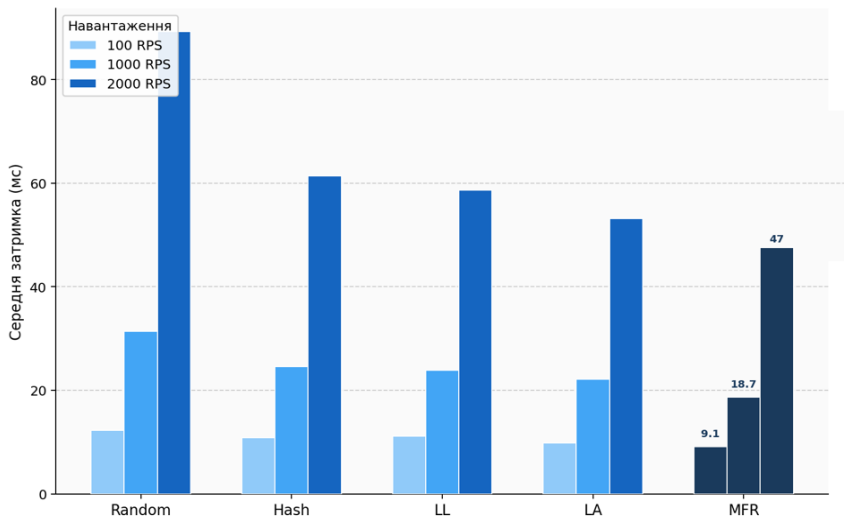


Рис. 1. Середня затримка (мс) методів Random, Hash, LL, LA та MFR при навантаженні 100, 1000 і 2000 RPS

Зниження CV з 48.9% (Random) до 24.6% (MFR) при 2000 RPS вказує на значно більш стабільну та передбачувану поведінку системи – критичну характеристику для SLA-орієнтованих застосунків. P95-затримка при 2000

RPS становить 80.7 мс (MFR) проти 162.4 мс (Random), що відповідає зниженню на 50.3%. Зменшення P95-латентності є особливо важливим показником, оскільки саме хвостова затримка визначає суб'єктивну якість обслуговування для кінцевих користувачів.

Це узгоджується з теоретичною моделлю: рівномірний розподіл навантаження усуває чергу на перевантажених вузлах – основне джерело хвостових затримок. Latency-Aware поступається MFR у середньому на 11.4%, оскільки не враховує ресурсний стан вузлів.

Таблиця 2. Пропускна здатність системи (успішно виконаних запитів/с)

RPS	Random	Hash	Least-Loaded	Latency-Aware	MFR
500	471	489	493	495	498
1000	903	951	958	967	982
1500	1281	1389	1401	1418	1437
2000	1548	1712	1731	1768	1820

При інтенсивності 2000 RPS MFR забезпечує пропускну здатність 1820 запитів/с, що перевищує показники Random на 17.6%, Hash на 6.3%, LL на 5.1% та LA на 2.9%. Перевага над LA є меншою, оскільки цей метод також ефективно знижує мережеву затримку; проте MFR стабільно перевищує його завдяки одночасному врахуванню ресурсного та топологічного факторів. Загальне середнє збільшення пропускну здатності порівняно з Random становить 41.2% у діапазоні 500–2000 RPS.

Таблиця 3. Завантаженість CPU вузлів (%) при навантаженні 1500 RPS

Метод	N1	N2	N3	N4	N5	Пік	Std Dev
Random	71.2	68.4	82.1	41.3	73.8	82.1	15.3
Hash	64.8	71.1	59.3	78.4	62.7	78.4	7.6
LL	62.1	65.3	61.8	63.4	62.9	65.3	1.8
LA	69.4	67.2	72.8	54.1	71.3	72.8	7.1
MFR	61.3	58.7	63.1	57.4	60.9	63.1	2.3

MFR досягає стандартного відхилення 2.3% – показника, зіставного з LL (1.8%), – однак з нижчим піковим значенням (63.1% проти 65.3%). Це узгоджується з теоретичною моделлю: LL мінімізує завантаженість, але ігнорує локальність даних, що призводить до додаткових внутрішньо-кластерних пересилань і незначного підвищення пікового CPU. LA концентрує навантаження на мережево-близьких вузлах (Std Dev = 7.1%), що суперечить меті рівномірного балансування. Застосувавши модель (3) з типовими параметрами ($a = 200$ Вт, $b = 80$ Вт), зниження пікового завантаження вузла з 82.1% (Random) до 63.1% (MFR) відповідає скороченню пікового енергоспоживання приблизно на 38 Вт. З урахуванням лінійності споживання при Load > 0.8 фактичний ефект є більшим: вихід з насиченої зони зменшує

теплове навантаження і дозволяє системі управління живленням переводити вузли у стани з нижчим TDP. У масштабі кластера з 50 вузлів це може становити економію понад 2 кВт встановленої потужності.

Упродовж 30-хвилинного тесту при поступовому зростанні навантаження з 100 до 2000 RPS значення коефіцієнтів еволюціонували наступним чином: α (CPU Load) зросло з 0.40 до 0.58, β (Latency) знизилось з 0.35 до 0.28, γ (DataDist) знизилось з 0.25 до 0.14. Ця динаміка узгоджується з теоретичною моделлю: при зростанні навантаження кореляція між Load та RT посилюється ($\text{Corr} > \varepsilon$), що автоматично збільшує α . При проведенні тесту з переважанням READ/WRITE операцій (90%/10%) механізм адаптації скорегував коефіцієнти до $\alpha = 0.29$, $\beta = 0.30$, $\gamma = 0.41$ – закономірно підвищивши пріоритет топологічного фактора. Жоден із перелічених конкурентних підходів не демонструє аналогічної здатності до автоматичної зміни пріоритетів факторів залежно від типу навантаження.

Висновки

У роботі розроблено та верифіковано метод оптимізації маршрутизації запитів у розподілених базах даних на основі багатофакторної моделі з механізмом автономного адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів.

Наукова новизна роботи полягає в наступному. На відміну від існуючих adaptive routing підходів, що застосовують евристичне або статичне налаштування вагів, у запропонованому методі адаптація є функцією статистики виконання запитів – зокрема, коефіцієнтів кореляції Пірсона між метриками вузлів і фактичними затримками у ковзному вікні. Це забезпечує статистично обґрунтовану та інваріантну до типу навантаження поведінку системи без участі адміністратора. Метод відрізняється від Least-Loaded, Latency-Aware та Geo-Distributed Routing тим, що одночасно оптимізує три класи факторів прийняття рішення – ресурсний, мережевий та топологічний – і робить це у самоналаштовувальному режимі.

Результати чисельного моделювання підтверджують ефективність методу. Середня затримка знижується на 38.4%, P95-латентність – на 44.1–50.3%, пропускна здатність зростає на 41.2%, пікове завантаження окремих вузлів зменшується на 29.7%, а стандартне відхилення завантаженості між вузлами скорочується у 6.7 раза. Коефіцієнт варіації latency знижується з 48.9% до 24.6% при максимальному навантаженні, що свідчить про значно стабільнішу поведінку системи. Отримані результати підтверджують, що запропонований підхід забезпечує наближення до оптимального розподілу навантаження в умовах неповної інформації про стан системи.

Запропонований метод має низку обмежень, що визначають напрями подальших досліджень:

- ефективність адаптивного механізму залежить від точності та своєчасності метрик вузлів: застарілі або некоректно кешовані значення призводять до хибних рішень маршрутизації.
- збір метрик у реальному часі генерує додатковий мережевий трафік; при малому TTL кешу цей overhead може бути невиправданим.
- при $k > 100$ вузлів складність $O(k)$ на кожне рішення потребує переходу до ієрархічної схеми.

– кореляційний аналіз Пірсона передбачає незалежність факторів, тоді як у реальних системах Load і Latency можуть бути взаємно корельованими: перевантажений вузол одночасно збільшує і завантаженість процесора, і мережеву затримку.

Це може призводити до подвійного врахування впливу одного й того ж явища та спотворення оцінки відносної важливості факторів. Потенційним розв'язком є попередня ортогоналізація факторів методом PCA, що є напрямом подальших досліджень.

Перспективи охоплюють кілька напрямів. Розробка варіанта механізму адаптації на основі авторегресійного аналізу часових рядів навантаження, що дозволить упереджувати майбутні перевантаження вузлів. Верифікація на реальних виробничих кластерах із 50–150 вузлами та гетерогенною топологією. Інтеграція маршрутизатора із механізмами semi-join для оптимізації розподілених JOIN-операцій між шардами, що є логічним продовженням авторських розробок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Reinsel, D., Gantz, J., & Rydning, J. (2018, November; data refreshed May 2020). The digitization of the world: From edge to core (IDC White Paper No. US44413318). International Data Corporation (IDC); Seagate. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/dataage-idc-report-final.pdf>
2. Mytton, D. (2020). Assessing the suitability of the Greenhouse Gas Protocol for calculation of emissions from public cloud computing workloads. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 9, 45. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00185-8>
3. Ongaro, D., & Ousterhout, J. (2014, May 20). In search of an understandable consensus algorithm (Extended version) [Technical report]. Stanford University. <http://ramcloud.stanford.edu/raft.pdf>
4. Lamport, L. (1998). The part-time parliament. *ACM Transactions on Computer Systems*, 16(2), 133–169. <https://doi.org/10.1145/279227.279229>
5. DeCandia, G., Hastorun, D., Jampani, M., Kakulapati, G., Lakshman, A., Pilchin, A., Sivasubramanian, S., Voshall, P., & Vogels, W. (2007). Dynamo: Amazon's highly available key-value store. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 41(6), 205–220. <https://doi.org/10.1145/1323293.1294281>
6. Cardellini, V., Casalicchio, E., Colajanni, M., & Yu, P. S. (2002). The state of the art in locally distributed Web-server systems. *ACM Computing Surveys*, 34(2), 263–311. <https://doi.org/10.1145/508352.508355>
7. Kraska, T., Pang, G., Franklin, M. J., Madden, S., & Fekete, A. (2013). MDCC: Multi-data center consistency. *Proceedings of the 8th ACM European Conference on Computer Systems (EuroSys '13)*, 113–126. <https://doi.org/10.1145/2465351.2465363>
8. Corbett, J. C., Dean, J., Epstein, M., Fikes, A., Frost, C., Furman, J. J., Ghemawat, S., Gubarev, A., Heiser, C., Hochschild, P., et al. (2013). Spanner: Google's globally distributed database. *ACM Transactions on Computer Systems*, 31(3), Article 8, 1–22. <https://doi.org/10.1145/2491245>
9. Белоус, Р., Крилов, Є., & Анікін, В. (2021). Методи оптимізації запитів розподілених БД. *Адаптивні системи автоматичного управління*, 2(39). <https://doi.org/10.20535/1560-8956.39.2021.247364>
10. Белоус, Р. В., & Крилов, С. В. (2024). Мінімізація мережевого трафіку в RAFT-like consensus algorithm. *Комунальне господарство міст*, 4(185). <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-2-6>
11. Özsu, M. T., & Valduriez, P. (2020). Principles of distributed database systems (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26253-2>

12. Stonebraker, M., & Cattell, R. (2011). 10 rules for scalable performance in 'simple operation' datastores. *Communications of the ACM*, 54(6), 72–80. <https://doi.org/10.1145/1953122.1953144>
13. Dayarathna, M., Wen, Y., & Fan, R. (2016). Data center energy consumption modeling: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 732–794. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2481183>
14. Белоус, Р., & Крилов, С. (2023). Оптимізація часу процесу узгодженості даних в NoSQL. *Технічні науки*, 3(321), 37–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-321-3-37-42>
15. Zheng, B., Li, X., Tian, Z., & Meng, L. (2022). Optimization method for distributed database query based on an adaptive double entropy genetic algorithm. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141589>
16. Luo, W., Lai, D., Ren, B., Huang, X., & Chen, L. (2022). Dynamic load balancing algorithm for distributed database based on PI feedback. *Proceedings of the 2022 3rd International Conference on Big Data & Artificial Intelligence & Software Engineering (ICBASE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICBASE57498.2022.9969759>

Стаття надійшла до редакції 16.01.2026, надійшла після рецензування 27.02.2026, прийнята 25.03.2026

REFERENCES

1. Reinsel, D., Gantz, J., & Rydning, J. (2018, November; data refreshed May 2020). The digitization of the world: From edge to core (IDC White Paper No. US44413318). International Data Corporation (IDC); Seagate. <https://www.seagate.com/files/www-content/our-story/trends/files/dataage-idc-report-final.pdf>
2. Mytton, D. (2020). Assessing the suitability of the Greenhouse Gas Protocol for calculation of emissions from public cloud computing workloads. *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 9, 45. <https://doi.org/10.1186/s13677-020-00185-8>
3. Ongaro, D., & Ousterhout, J. (2014, May 20). In search of an understandable consensus algorithm (Extended version) [Technical report]. Stanford University. <http://ramcloud.stanford.edu/raft.pdf>
4. Lamport, L. (1998). The part-time parliament. *ACM Transactions on Computer Systems*, 16(2), 133–169. <https://doi.org/10.1145/279227.279229>
5. DeCandia, G., Hastorun, D., Jampani, M., Kakulapati, G., Lakshman, A., Pilchin, A., Sivasubramanian, S., Voshall, P., & Vogels, W. (2007). Dynamo: Amazon's highly available key-value store. *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, 41(6), 205–220. <https://doi.org/10.1145/1323293.1294281>
6. Cardellini, V., Casalicchio, E., Colajanni, M., & Yu, P. S. (2002). The state of the art in locally distributed Web-server systems. *ACM Computing Surveys*, 34(2), 263–311. <https://doi.org/10.1145/508352.508355>
7. Kraska, T., Pang, G., Franklin, M. J., Madden, S., & Fekete, A. (2013). MDCC: Multi-data center consistency. *Proceedings of the 8th ACM European Conference on Computer Systems (EuroSys '13)*, 113–126. <https://doi.org/10.1145/2465351.2465363>
8. Corbett, J. C., Dean, J., Epstein, M., Fikes, A., Frost, C., Furman, J. J., Ghemawat, S., Gubarev, A., Heiser, C., Hochschild, P., et al. (2013). Spanner: Google's globally distributed database. *ACM Transactions on Computer Systems*, 31(3), Article 8, 1–22. <https://doi.org/10.1145/2491245>
9. Belous, R., Krylov, Y., & Anikin, V. (2021). Query optimization methods for distributed databases. *Adaptive Systems of Automatic Control*, 2(39). <https://doi.org/10.20535/1560-8956.39.2021.247364>
10. Belous, R. V., & Krylov, Y. V. (2024). Network traffic minimization in RAFT-like consensus algorithm. *Municipal Economy of Cities*, 4(185). <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2024-4-185-2-6>

11. Özsu, M. T., & Valduriez, P. (2020). Principles of distributed database systems (4th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26253-2>
12. Stonebraker, M., & Cattell, R. (2011). 10 rules for scalable performance in 'simple operation' datastores. *Communications of the ACM*, 54(6), 72–80. <https://doi.org/10.1145/1953122.1953144>
13. Dayarathna, M., Wen, Y., & Fan, R. (2016). Data center energy consumption modeling: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 732–794. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2481183>
14. Belous, R., & Krylov, Y. (2023). Optimization of data consistency process time in NoSQL. *Technical Sciences*, 3(321), 37–42. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2023-321-3-37-42>
15. Zheng, B., Li, X., Tian, Z., & Meng, L. (2022). Optimization method for distributed database query based on an adaptive double entropy genetic algorithm. *IEEE Access*, 10. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3141589>
16. Luo, W., Lai, D., Ren, B., Huang, X., & Chen, L. (2022). Dynamic load balancing algorithm for distributed database based on PI feedback. *Proceedings of the 2022 3rd International Conference on Big Data & Artificial Intelligence & Software Engineering (ICBASE)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICBASE57498.2022.9969759>

The article was received 16.01.2026, received after revision 27.02.2026, accepted 25.03.2026

Белоус Роман Володимирович

доктор філософії (PhD), молодший 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/0000-0002-7588-941X> **e-mail:** belous22@ukr.net

Мосійчук Дмитро Іванович

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3864-1019> **e-mail:** deusplus@gmail.com

УДК 004.8

Pavlo Krysenko, Doctor of Philosophy, Research Assistant

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5612-9474> **e-mail:** p.krysenko@gmail.com

Alim Bektimirov, lead engineer

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-8572-7952> **e-mail:** alim.bektimirov@gmail.com

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

THE PROBLEM OF IC50 PREDICTION FOR LIGAND-PROTEIN PAIRS USING TRANSFORMER ARCHITECTURE UNDER LIMITED RESOURCES

Annotation. The article discusses approaches to optimizing the training of models for predicting the half-maximal inhibitory concentration (IC50) of ligand-protein pairs under limited computational resources. A method of smart bucketing of data by protein length with a dynamic selection of the number of groups to improve randomization is proposed. To solve the problem of the quadratic complexity of the Transformer architecture, a convolution layer was used to compress the input data. Based on 4 conducted experiments, the relationship between the degree of sequence compression and the obtained root mean square error (RMSE) for lgIC50 was analyzed.

Key words: deep learning, ligand, protein, bioinformatics, convolutional neural networks, data compression.

П. Крисенко, А. Бектіміров

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

ПРОБЛЕМАТИКА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКА IC50 ДЛЯ ПАР ЛІГАНД-БІЛОК ЗА ДОПОМОГОЮ АРХІТЕКТУРИ TRANSFORMER В УМОВАХ ОБМЕЖЕНИХ РЕСУРСІВ

Анотація. У статті розглядаються підходи до оптимізації навчання моделей для прогнозування напівмаксимальної інгібіторної концентрації (IC50) пар ліганд-білок в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Запропоновано метод розумного групування (bucketing) даних за довжиною білка з динамічним підбором кількості груп для покращення рандомізації. Для вирішення проблеми квадратичної складності архітектури Transformer використано шар згортки для компресії вхідних даних. На основі 4 проведених експериментів проаналізовано співвідношення між ступенем стиснення послідовності та отриманим коренем з середньоквадратичної похибки (RMSE) для lgIC50.

Ключові слова: глибоке навчання, ліганд, білок, біоінформатика, згорткова нейронна мережа, компресія даних.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2026.2.287-292>

© П. Крисенко, А. Бектіміров, 2026

Вступ

Прогнозування спорідненості зв'язування між лігандом та білком-мішенню є ключовим етапом у сучасному комп'ютерному дизайні ліків [1]. Однією з найважливіших кількісних метрик цієї взаємодії є напівмаксимальна інгібіторна концентрація (IC50) [2]. З розвитком методів глибокого навчання, зокрема архітектур на основі механізмів уваги, точність прогнозування значно зросла. Проте використання класичного Transformer стикається з серйозною перешкодою – квадратичною обчислювальною складністю відносно довжини вхідної послідовності. Білкові ланцюги можуть бути надзвичайно довгими, що призводить до експоненційного зростання споживання пам'яті та унеможливорює ефективне навчання моделей в умовах обмежених апаратних ресурсів. Метою цієї роботи є дослідження методів оптимізації пайплайну навчання для зменшення обчислювального навантаження без значної втрати точності прогнозування.

Результати дослідження

Для подолання жорстких обмежень обчислювальних ресурсів під час дослідження було розроблено та імплементовано комплекс оптимізаційних підходів: на рівні попередньої обробки даних та на рівні самої архітектури нейронної мережі.

При формуванні пакетів даних для навчання моделей на послідовностях різної довжини традиційно використовується додавання нульових токенів (padding) до довжини найдовшого елемента в батчі. У випадку білків це призводить до того, що відеокарта витрачає ліву частку обчислень на обробку «порожніх» токенів. Прямолінійне сортування [4] всього датасету за довжиною частково вирішує цю проблему, але порушує базове правило стохастичного градієнтного спуску щодо випадковості вибірки, що веде до перенавчання моделі.

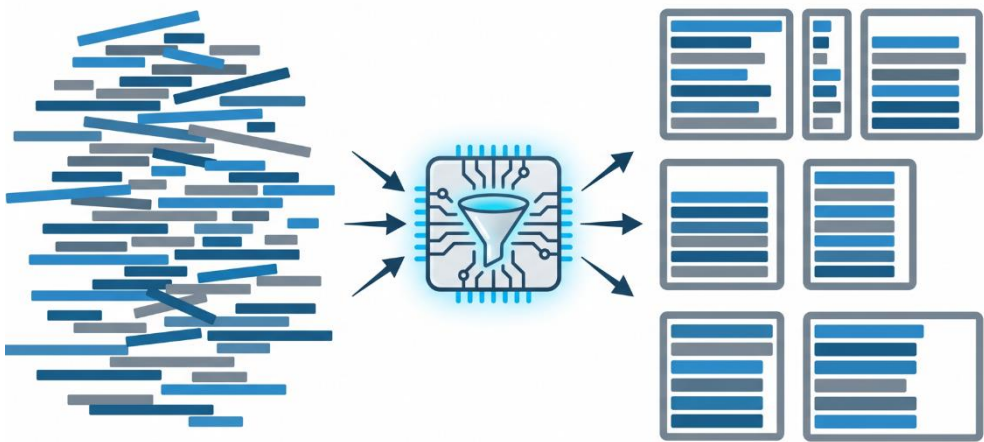


Рис. 1. Схематичний вигляд алгоритму smart bucketing

У даній роботі був застосований алгоритм розумного групування (smart bucketing). Він динамічно аналізує розподіл довжин білків у навчальній вибірці та самостійно розбиває дані на оптимальну кількість груп таким чином, щоб усередині кожного кошика довжини послідовностей були максимально близькими. При формуванні батчу алгоритм випадковим чином обирає кошик, а потім дістає звідти необхідну кількість семплів. Це радикально економить пам'ять, зберігаючи необхідний рівень рандомізації між ітераціями.

Основою запропонованої моделі є адаптована архітектура типу Енкодер-Декодер (Encoder-Decoder) [3], яка найкраще підходить для задач парної взаємодії, якою і є зв'язування ліганду з білком-мішенню, що зображена на рис. 2. Замість базової конкатенації ознак обох молекул, архітектура обробляє їх паралельно з подальшим структурним злиттям.

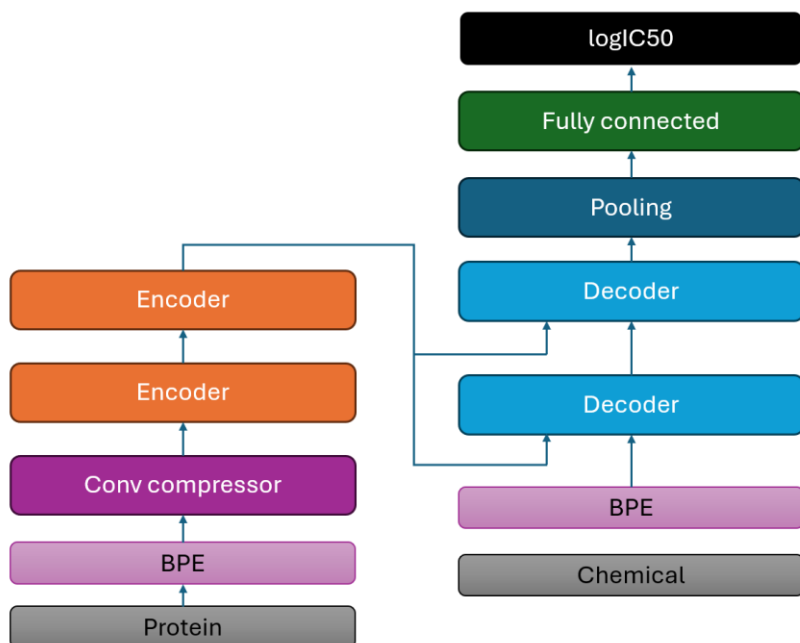


Рис. 2. Схематичне зображення архітектури

Енкодер білка (Protein Encoder): саме на цьому етапі класичний механізм самоуваги (Self-Attention) стикається з проблемою квадратичної складності. Щоб Transformer не «страждав» від надмірної довжини вхідних даних, перед блоками уваги було інтегровано модуль компресії, який імплементований за допомогою одновимірної згортки (1D Convolution), який зображений на рис. 3. Цей шар діє як локальний екстрактор ознак, виявляючи біологічні мотиви (наприклад, альфа-спіралі) та здійснюючи просторову компресію вхідних послідовностей (ембедингів). Завдяки згортці з визначеним кроком (stride), фізична довжина послідовності зменшується кратно, що експоненційно знижує навантаження на наступні шари Transformer Encoder, які формують глибоке контекстне розуміння структури білка.

Ключовим етапом прогнозування IC50 є моделювання фізико-хімічної взаємодії між двома молекулами. Для цього використовується декодер з механізмом перехресної уваги (Cross-Attention) [6]. У цій конфігурації стиснуті

та контекстуалізовані репрезентації білка виступають як ключі та значення (Keys, Values), а репрезентації ліганду — як запити (Queries).

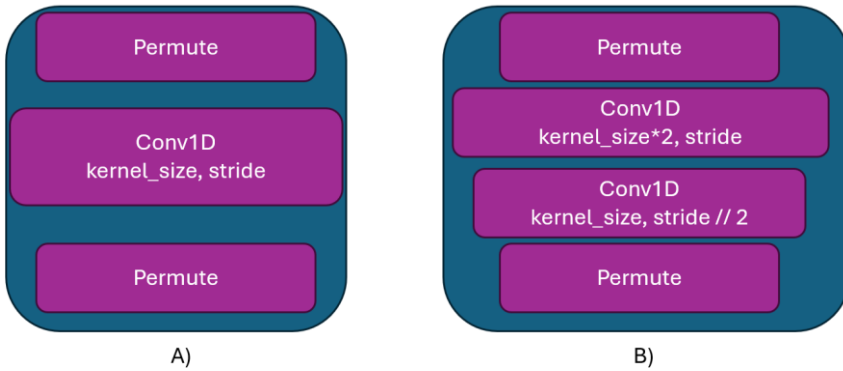


Рис. 3. Модулі A) small conv compression та B) medium conv compression

Це дозволяє моделі динамічно «фокусувати» увагу на тих ділянках білка (наприклад, активних центрах або сайтах зв'язування), які мають найбільшу афінність до конкретних функціональних груп ліганду.

Після блоку Cross-Attention отримані вектори ознак агрегуються і подаються на багатошаровий перцептрон (MLP), який безпосередньо регресує значення логарифму напівмаксимальної інгібіторної концентрації (lgIC50).

Для оновлення ваг моделі було обрано алгоритм оптимізації AdamW [7]. На відміну від стандартного Adam, AdamW відокремлює зменшення ваг (weight decay) від кроку оптимізації. У поєднанні з архітектурою Transformer це критично важливо, оскільки забезпечує значно кращу генералізаційну здатність моделі та запобігає її швидкому перенавчанню на складних паттернах ліганд-білкових взаємодій.

Для перевірки гіпотез було проведено серію з 4 експериментів. На рис. 4 зображено значення лосс функції для тренувальної та тестувальної вибірок для кожного з експериментів в залежності від епохи. Головною змінною виступало співвідношення компресії вхідної послідовності (зміна параметру stride (S) у згортковому шарі білкового енкодера). Оцінювався вплив цього коефіцієнта на фінальну метрику RMSE для lgIC50.

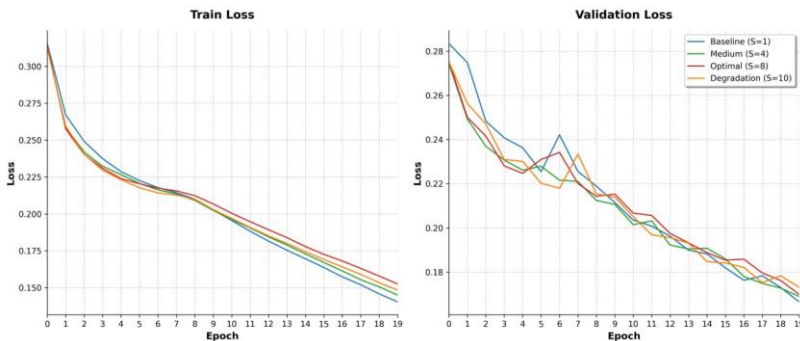


Рис. 4. Графік лосс функцій для 4 експериментів на тренувальній та тестувальній вибірках

Після отримання найкращої моделі для кожного з експериментів було підраховано корінь з середньоквадратичної похибки для тестувальної вибірки. Результати показані в таблиці. 1.

Таблиця 1. Результати моделей на тестувальній вибірці

Модель	RMSE
Stride = 1, Kernel size = 3	0.5914
Stride = 4, Kernel size = 9	0.5951
Stride = 8, Kernel size = 17	0.5952
Stride = 10, Kernel size = 21	0.6010

Висновки

Проведена серія з 4 експериментів переконливо доводить, що квадратична обчислювальна складність архітектур на базі механізмів уваги не є нездоланною перешкодою для їх використання в задачах біоінформатики за умов суворо обмежених апаратних ресурсів.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити декілька ключових висновків щодо запропонованого оптимізаційного пайплайну.

Інтеграція шару 1D-згортки в Енкодер білка виконала подвійну функцію. З одного боку, вона забезпечила критично необхідну просторову компресію послідовності, кратно зменшивши споживання відеопам'яті. З іншого боку, згортка спрацювала як ефективний індуктивний зсув. Вона агрегувала локальні амінокислотні мотиви (елементи вторинної структури білка) у більш інформативні токени ще до того, як Transformer почав розраховувати глобальні залежності. В ході експериментів було визначено оптимальний поріг стиснення (баланс між розміром ядра та кроком згортки), після якого метрика MSE для IgIC50 починає різко деградувати, що свідчить про межу незворотної втрати структурної інформації.

Практична цінність роботи полягає у суттєвому зниженні бар'єра входження для проведення досліджень у галузі *in silico* скринінгу. Запропонована архітектура з компресією вхідного простору не лише дозволяє розгортати високоточні моделі на апаратному забезпеченні споживчого класу, але й створює фундамент для подальшої оптимізації подібних моделей під інференс на пристроях із жорсткими обмеженнями за кількістю параметрів та пам'яттю (edge computing). Подальші дослідження можуть бути спрямовані на застосування розроблених методів компресії до тривимірних (3D) просторових графів молекул.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ \ REFERENCES

- [1] Zoziuk, M., Krysenko, P., Dovgiy, S., Makarov, V., Yakimenko, Y., & Koroliouk, D. (2026, April 10). Transformer with BPE tokenization for analysis of interactions of chemical substances and proteins. *Computational Methods and Mathematical Modeling in Cyberphysics and Engineering Applications* 2, pp. 289–299. doi:10.1002/9781394454518.ch9
- [2] Öztürk, H., Özgür, A., & Ozkirimli, E. (2018). DeepDTA: deep drug-target binding affinity prediction. *Bioinformatics* (Oxford, England), 34(17), i821–i829. doi:10.1093/bioinformatics/bty593

- [3] Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., ... & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in neural information processing systems*, 30.
- [4] Tay, Y., Dehghani, M., Bahri, D., & Metzler, D. (2022). Efficient Transformers: A Survey. *ACM Comput. Surv.*, 55(6). doi:10.1145/3530811
- [6] Huang, K., Fu, T., Glass, L. M., Zitnik, M., Xiao, C., & Sun, J. (2021). DeepPurpose: a deep learning library for drug-target interaction prediction. *Bioinformatics* (Oxford, England), 36(22–23), 5545–5547. doi:10.1093/bioinformatics/btaa1005
- [7] Loshchilov, I., & Hutter, F. (2017). Decoupled weight decay regularization. doi:10.48550/arXiv.1711.05101

Стаття надійшла до редакції 10.02.2026, надійшла після рецензування 23.03.2026, прийнята 16.04.2026

The article was received 10.02.2026, received after revision 23.03.2026, accepted 16.04.2026

Крисенко Павло

доктор філософії, молодший науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCHID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5612-9474> **e-mail:** p.krysenko@gmail.com

Бектіміров Алім

провідний інженер, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCHID ID: <https://orcid.org/0009-0007-8572-7952> **e-mail:** alim.bektimirov@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copyring © authors of publications, Institute of Telecommunications and Global Information Space of NAS of Ukraine, Kyiv National University of Construction and Architecture. All rights reserved.

ДО УВАГИ АВТОРІВ ЗБІРНИКА

Зміст матеріалів, що направляються до редакції, повинен відповідати профілю та науково-технічному рівню збірника.

Кожна наукова стаття повинна мати вступ, розділи основної частини та висновки, а також анотацію і ключові слова (не менше п'яти) двома мовами (українською та англійською).

Підготовка статті здійснюється в текстовому редакторі MS WORD for WINDOWS, з використанням шрифту Times New Roman, 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 01.05.26 Формат 70x108/16. Папір офсетний.
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 25.73
Обл.-вид. арк. 19.75
Замовлення № _____

Тираж 300 примірників

КИЇВ 2026