

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 52

2024

**Міністерство освіти і науки України  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
Національна академія наук України  
Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору**

---

**Ministry of Education and Science of Ukraine  
Kyiv National University of Construction and Architecture  
National Academy of Sciences of Ukraine  
Institute of Telecommunications and Global Information Space**

# **ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

---

## **ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES**

**Збірник наукових праць**

Випуск 4 (52), жовтень – грудень 2024 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 4 (52), October – December 2024

Founded in 2008  
The journal is published 4 times a year

---

**КИЇВ 2024**

**KYIV 2024**

**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**Ю.І. КАЛЮХ**, д-р техн. наук, проф.**ВИКОНАВЧИЙ РЕДАКТОР:****РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ****В.О. ВАСЯНИН**, д-р техн. наук**О.А. ВЛАДИМИРСЬКИЙ**, д-р техн. наук**О.М. ГУНЧЕНКО**, канд. техн. наук, проф.**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**Д.В. СТЕФАНИШИН**, 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**В.М. ТРИСНОК**, д-р техн. наук**В.О. УСТИМЕНКО**, д-р фіз.-мат. наук, проф.**В.Ф. ФРОЛОВ**, д-р техн. наук, проф.**Д.І. ЧЕРНІЙ**, д-р техн. наук**С.Й. ШАМАНСЬКИЙ**, д-р техн. наук**Є.О. ЯКОВЛЄВ**, д-р техн. наук**МІЖНАРОДНА РЕДАКЦІЙНА РАДА****М.-Й. ВАЛЕРІ**, проф., Польща**М. ЖЕЛЕЗНЯК**, д-р техн. наук, професор,  
Фукусіма, Японія**Д. МІНТЕР**, проф., Великобританія**А. МІШО**, дослідник, Франція**М.Г. МУСТАФАЄВ**, д-р с.-г. наук, Азербайджан**Я. ПЕКУТІН**, проф., Польща**ПІНГ ЛУ**, проф., Китай

---

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол №18 від 18.12.2024)

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

**ОСНОВНІ ТЕМАТИЧНІ РОЗДІЛИ ЗБІРНИКА**

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

**АДРЕСА РЕДАКЦІЇ**

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

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



Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

## ЗМІСТ

### ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

<b>Ляшенко В.І., Дудар Т.В., Стусь В.П., Шаповалов В.А.</b> Вдосконалення комбінованих технологій підземного блокового вилуговування металів із позабалансових і некондиційних руд.....	5
<b>Мітрясова О.П., Мац А.Д., Чвир В.А., Смирнов В.М.</b> Порівняльний аналіз нормативів якості атмосферного повітря і поверхневих вод в Україні та ЄС.....	28
<b>Гончаренко А.В.</b> Визначення кліматичних ризиків в будівельній галузі на фоні воєнних дій.....	45
<b>Шумбар К.В., Щербак А.І., Кравченко М.В., Василенко Л.О., Березницька Ю.О.</b> Вплив робочих параметрів на продуктивність та ефективність зворотноосмотичних мембран: моделювання за допомогою моделі «розчин-дифузія».....	53
<b>Radlovska K.</b> Automated control systems microclimate facilities, monitoring and audit within oil fields influence.....	65
<b>Petrushka I., Latsyk N., Petrushka K.</b> Modeling of fine dust distribution in atmospheric air within residential buildings.....	69

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<b>Максименко А.В., Клімова І.В.</b> Зниження рівня акустичного забруднення, що генерується автотранспортом.....	81
--	----

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<b>Лупенко С.А., Воляник О.В.</b> Удосконалена онтологічна модель бази знань експертної системи підтримки прийняття рішень в галузі цифрового опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів	92
<b>Єгоров В.О.</b> Система автоматизованого програмного управління антенною системою супутникового радіомоніторингу.....	99
<b>Воскобійник В.А., Воскобойник О.А., Харченко А.Г., Воскобійник А.В.</b> Трансформація хвильового поля проникною вертикальною стінкою.....	106
<b>Худинцев М.М., Палажченко І.Л.</b> Моделі зрілості кібербезпеки для оцінювання кібербезпеки у критичній інфраструктурі.....	122
<b>Марущак В.М., Волинець Т.В.</b> Інформаційні системи дешифрування зображень з використанням аерокосмічних технологій.....	135
<b>Триснюк В.М., Горошкова Л.А., Охарєв В.О., Шумейко В.О.</b> Геоінформаційні технології дослідження екосистем острова Хортиця в умовах війни.....	145
<b>Гордєєв А.Ю., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І., Щипцов О.О., Невєрова С.І.</b> Деякі аспекти створення системи забезпечення та контролю якості океанографічних даних.....	157
<b>ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....</b>	169

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

<b>Lyashenko V., Dudar T., Stus V., Shapovalov V.</b> Improvement of combined technologies of underground block leaching of metals from out of balance and unconditioned ores.....	5
<b>Mitryasova O., Mats A., Chvyr V., Smyrnov V.</b> Comparative analysis of atmospheric air and surface water quality standards in Ukraine and EU.....	28
<b>Goncharenko A.</b> Determination of climate risks in the construction industry against military actions.....	45
<b>Shumbar K., Shcherbak A., Kravchenko M., Vasylenko L., Bereznytska Ju.</b> Influence of operating parameters on the performance and efficiency of reverse osmosis membranes: modelling with the solution-diffusion model.....	53
<b>Radlovska K.</b> Automated control systems microclimate facilities, monitoring and audit within oil fields influence.....	65
<b>Petrushka I., Latsyk N., Petrushka K.</b> Modeling of fine dust distribution in atmospheric air within residential buildings.....	69

### CIVIL SAFETY

<b>Maksymenko A., Klimova I.</b> Reducing the level of acoustic pollution generated by road transport.....	81
--	----

### INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

<b>Lupenko S., Volianyk O.</b> Improved ontological model of the knowledge base of the expert system for decision support in the field of digital processing and computer simulation of cyclic signals.....	92
<b>Yehorov V.</b> System of automated software control of the antenna system of the satellite.....	99
<b>Voskoboinick V., Voskoboinyk O., Kharchenko A., Voskobiinyk A.</b> Transformation of wave field by permeable vertical wall.....	106
<b>Khudyntsev M., Palazhchenko I.</b> Cybersecurity maturity models for cybersecurity assessment in critical infrastructure.....	122
<b>Maruschak V., Volynets T.</b> Information systems of deciphering images using aerospace technologies.....	135
<b>Trysnyuk V., Horoshkova L., Okhariev V., Shumeiko V.</b> Geographic information technologies for research ecosystem of Khortytsa island at state of war.....	145
<b>Gordeev A., Fedoseienkov S., Shundel O., Shchypstov O., Nevierova S.</b> Some aspects of creating a system of oceanographic data quality assurance and control.....	157
<b>INFORMATION FOR AUTHORS</b> .....	169

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDK 622.725:553.945 (088.8)

**Vasil Lyashenko**<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, Senior Researcher, Head of the Research Department

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-4179> *e-mail*: [vilyashenko2017@gmail.com](mailto:vilyashenko2017@gmail.com)

**Tamara Dudar**<sup>2</sup>, Doctor of technical Sciences, Senior Researcher, Professor, Head of the Department of Environmental Studies

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3114-9732> *e-mail*: [dudar@nau.edu.ua](mailto:dudar@nau.edu.ua)

**Viktor Stus**<sup>3</sup>, Doctor of medical sciences, Professor, Professor of the Department of Surgery No. 1 and Urology

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4539-8126> *e-mail*: [viktor.stus@gmail.com](mailto:viktor.stus@gmail.com)

**Viktor Shapovalov**<sup>4</sup>, candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Occupational Safety and Civil Safety

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5965-2869> *e-mail*: [Shapovalov@knu.edu.ua](mailto:Shapovalov@knu.edu.ua)

<sup>1</sup>State Enterprise «Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology», Zhovti Vody, Ukraine

<sup>2</sup>National Aviation University, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Dnipro State Medical University, Dnipro, Ukraine

<sup>4</sup>State Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine

## IMPROVEMENT OF COMBINED TECHNOLOGIES OF UNDERGROUND BLOCK LEACHING OF METALS FROM OUT OF BALANCE AND UNCONDITIONED ORES

***Abstract.** The object of the research is technologies and technical means for combined leaching of metals from hard ores in installations mounted in underground leaching blocks (BWB) with their preliminary crushing by explosives (BV). One of the most problematic places is the difficulty of achieving the specified quality of crushing, as well as the necessary height of ore storage in the chamber for further leaching of metals and the coefficient of loosening, taking into account the management of the energy of explosive destruction of rock ores. In the course of the study, the following were used: data from literary sources and patent documentation in the field of technologies and technical means for PBV of metals from ores in energy-disturbed massifs, substantiation of technological parameters of operational units; laboratory and production experiments; physical modeling of metal extraction from ores from the average linear size of a piece of blasted ore. Analytical studies, comparative analysis of theoretical and practical results using standard and new methods were performed with the participation of the*

authors. It was established that the most intense infiltration leaching occurs in the size class of ore pieces  $-100+0$  mm. For the Michurynske deposit, Ukraine, during leaching, it is recommended that the yield of such a fraction in the reflected ore is about 90%. Metals are extracted less intensively and longer from fractions of  $-200+100$  mm. It has been proven that the main place in PBV should be occupied by the explosive preparation of ore, which ensures effective extraction of metal from stored ores with a loosening coefficient of  $1.15 > Kr < 1.20$ , which is regulated by the volume of ore released from the block (up to 30%) and parameters cameras (length, width and height). The extraction of metal  $\xi$ , %, which significantly depends on the average linear size of a piece of blasted ore dcp and with a high degree of reliability ( $R^2 = 0.97$ ), was established. Due to the involvement in the production of substandard and off-balance ores, the raw material base of metal extraction at existing mines and those that are being built again can be increased by 1.4–1.6 times. Research results can be used during the underground development of ore deposits of off-balance and non-conditional ores of complex structure.

**Keywords:** metal leaching, ore crushing, efficiency, environmental management.

**В.І. Ляшенко<sup>1</sup>, Т.В. Дудар<sup>2</sup>, В.П. Стусь<sup>3</sup>, В.А. Шаповалов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектно-розвідувальний інститут промислової технології», м. Жовті Води, Україна

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

<sup>3</sup>Дніпровський державний медичний університет, м. Дніпро, Україна

<sup>4</sup>Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, Україна

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПІДЗЕМНОГО БЛОКОВОГО ВИЛУГОВУВАННЯ МЕТАЛІВ ІЗ ПОЗАБАЛАНСОВИХ І НЕКОНДИЦІЙНИХ РУД**

**Анотація.** Об'єктом дослідження є технології та технічні засоби для комбінованого вилуговування металів із позабалансових і некондиційних міцних руд в установках, змонтованих у гірничих виробках блоків підземного вилуговування (ПБВ) із попереднім їх дробленням вибуховими речовинами (ВР). Одним із найпроблемніших місць є складність досягнення заданої якості дроблення, а також необхідної висоти магазинування руди в камері для подальшого вилуговування металів та коефіцієнта розпушення з урахуванням керування енергією вибухового руйнування скальних руд. У ході дослідження використовувалися: дані літературних джерел та патентної документації у галузі технологій та технічних засобів для ПБВ металів із руд в енергопорушених масивах, обґрунтування технологічних параметрів експлуатаційних блоків; лабораторні та виробничі експерименти; фізичне моделювання вилучення металу із руд від середнього лінійного розміру шматка підірваної руди. Виконано аналітичні дослідження, порівняльний аналіз теоретичних та практичних результатів за стандартними та новими методиками з участю авторів. Встановлено, що найінтенсивніше інфільтраційне вилуговування відбувається при класі крупності рудних шматків  $-100+0$  мм. Для Мічуринського родовища, Україна при вилуговуванні рекомендується вихід такої фракції в руді, що відбивається, близько 90%. Менш інтенсивно і триваліше витягують метали з фракцій  $-200+100$  мм. Доведено, що основне місце при ПБВ повинна займати вибухова підготовка руди, що забезпечує ефективне вилучення металу із замагазинованих руд при коефіцієнті розпушення  $1,15 > Kr < 1,20$ , який регулюється обсягом руди, що

випускається з блоку (до 30%), і параметрами камер (довжина, ширина та висота). Встановлено вилучення металу  $\zeta$ , %, яке істотно залежить від середнього лінійного розміру шматка підірваної руди  $d_{cp}$  із високим ступенем достовірності ( $R^2 = 0,97$ ). За рахунок залучення у виробництво некондиційних та позабалансових руд сировинна база видобутку металів на діючих шахтах і тих, що знову будуються, може бути збільшена в 1,4–1,6 рази. Результати досліджень можуть бути використані під час підземної розробки рудних родовищ позабалансових та некондиційних руд складної структури.

**Ключові слова:** вилуговування металів, дроблення руди, ефективність, природокористування

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.5-27>

## Вступ

Світові інтеграційні процеси з посиленням конкурентної боротьби за виживання супроводжуються припиненням діяльності малоприбуткових чи дотаційних гірничих підприємств. У прагненні зберегти економічну ефективність активізується вибіркова розробка найбагатших ділянок родовищ із переведенням значної частини запасів у категорію неактивних [1, 2]. У той же час запаси багатьох родовищ, некондиційні або позабалансові для традиційних способів отримання, є кондиційними і балансовими для комбінованих технологій із вилуговуванням металів. Такими є, наприклад, родовища в Україні, Північному Казахстані, Німеччині та інших розвинених гірничодобувних країнах світу [3, 4]. Підвищити ефективність отримання металів можна за рахунок впровадження комплексної технології, яка включає традиційну камерну систему із закладкою, що твердіє, і підземного блочного вилуговування (ПБВ) із скельних некондиційних або позабалансових руд та вилуговування на денній поверхні в кучах (штабелях) [5, 6]. Тому обґрунтування технології та технічних засобів для ПБВ металів із скельних некондиційних або позабалансових руд, що забезпечують підвищення економічної ефективності, раціональне використання та охорону надр, а також збільшення сировинної бази виробництва металів на шахтах, що діють, – актуальне наукове, практичне та соціальне завдання, що потребує нагального рішення. Наукові та практичні результати отримані під час виконання науково-дослідних робіт за темами (науковий керівник – Ляшенко В.І.): «Дослідження напруженого стану гірничого масиву, здатного до прояву гірничого тиску, оцінка стійкості камер та обґрунтування їх безпечних параметрів на шахтах ДП «СхідГЗК» («Параметри камери» – номер державної реєстрації 0105U001957); «Сейсмічний моніторинг дій вибухових робіт в межах гірничого відведення шахти ДП «СхідГЗК» (номер державної реєстрації №0109U002127); «Дослідження та розробка сейсдобезпечної технології підготовки рудної маси до підземного блокового вилуговування покладів 1, 4, 5, 10 на поверххах 280–210 м Мічурінського родовища» – номер державної реєстрації 0108U008931) та інші. Означена робота є продовженням досліджень, основні наукові та практичні результати яких найбільш повно наведені у роботах [7, 8]. Об'єктом дослідження є традиційні гірничі технології та технічні засоби в поєднанні з ПБВ металів із скельними рудами та попереднім їх дробленням вибуховими речовинами (ВР). Існують різні технологічні схеми ПБВ, з якими широко застосовується вилуговування металів із проникненням у природному заляганні через свердловини,



пробурені з поверхні. Також можливе застосування схеми з попереднім дробленням скельних руд вибухами ВР. Із найбільш проблемних місць є складність досягнення заданої якості дроблення, а також необхідної висоти зберігання руди в камері та її параметрів для подальшого вилуговування металів і коефіцієнта розпушування з урахуванням енергії вибухового руйнування скельних руд. Дослідження гірничих аспектів вилуговування та розробка наукових основ і способів його здійснення є одним із нагальних завдань гірничодобувного виробництва [9, 10].

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Залучення у виробництво запасів, що списуються, має не тільки економічне значення, а й стратегічне. Означене служить зміцненню мінерально-сировинної бази і національної безпеки держав, оскільки в процесі вилуговування попутно витягуються стратегічні рідкоземельні метали. Реальну можливість залучити у виробництво мінерально-сировинні ресурси надають технології з вилуговування металів із відбитих та замагазинних у камерах руд ПБВ, а також на денній поверхні у складованих у купах чи штабелях (купне вилуговування). Однак тривалість процесів компенсації витрат перешкоджає розширенню сфери застосування цих технологій, хоча на гірничо-хімічних та гірничо-збагачувальних комбінатах обсяг видобутку вилуговування металів збільшується [11, 12]. Розробкою, опробуванням та впровадженням у виробництво ефективних технологій займається низка науково-дослідних, проектно-конструкторських та вищих навчальних закладів України. Зокрема, означені дослідження в Україні здійснює Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова Національної академії наук України (ІДТМ НАН України, м. Дніпро): роботи А.Ф. Булата, О.М. Зоріна, В.В. Виноградова, Т.А. Паламарчука; Науково-дослідний гірничорудний інститут Криворізького національного університету (НДГРІ КНУ, м. Кривий Ріг): роботи А.Г. Каткова, І.С. Зіцера, В.С. Нігматуліна, В.П. Волощенко, В.В. Цариковського, Г.К. Хижняка, А.П. Григор'єва, В.Д. Запорожця, В.І. Миконця; Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро: роботи М.М. Протодяконова, О.М. Дінника, А.В. Савостьянова, С.Г. Борисенко, О.І. Зільбермана, О.В. Колоколова, В.І. Бондаренко, П.І. Пономаренко, Г.А. Симановича, Л.М. Ширіна, В.І. Бузіло, В.Я. Кириченко, Ю.М. Халімендика, О.Є. Хоменко; Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг: роботи Г.М. Малахова, Ю.П. Капленко, В.Ф. Лавріненко, Б.М. Андрєєва, Є.І. Логачова, В.А. Калініченко; Державне підприємство «Український науково-дослідний та проектно-розвідувальний інститут промислової технології» (ДП «УкрНДПРІ промтехнології, м. Жовті Води): роботи О.К. Авдєєва, В.М. Мельниченка, Ю.Й. Кошика, М.М. Слепцова, Ю.Я. Савельєва, В.І. Ляшенка, та інші [13, 14]. Незважаючи на позитивний досвід промислового вилуговування, поки тільки урану, міді, золота, недостатня вивченість процесу перешкоджає широкому впровадженню методу на родовищах руд інших металів. Підземне вилуговування в блоках без урахування всіх природно-техногенних факторів може дискредитувати ідею, тому основним завданням розвитку методу є розробка наукових засад нової технології [15].

## **Мета досліджень**

*Мета дослідження* – вдосконалення комбінованих технологій підземного блокового вилуговування металів із позабалансових і некондиційних руд. Це підвищить екологічну безпеку та природокористування, економічну ефективність, покращить раціональне використання та охорону надр, а також збільшить сировинну базу видобутку металів на діючих шахтах у 1,4–1,6 рази.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз теорій та практики буровибухової підготовки та відбійки великих обсягів рудних мас для ПБВ металів із скельних некондиційних та позабалансових руд;
- обґрунтувати ефективність охорони надр при підземній розробці рудних родовищ традиційними технологіями (камерами із погашенням техногенних пустот закладкою) та комбінованими з вилуговуванням металів із скельних некондиційних та позабалансових руд (в камерах та на земній поверхні в штабелях-купах);
- розробити методику визначення ефективності підземної розробки рудних родовищ шляхом порівняння показника повноти вилучення корисного компонента з надр традиційними та комбінованими технологіями.

## **Методика дослідження**

У ході дослідження використано методи комплексного узагальнення, аналізу та оцінки практичного досвіду і останніх наукових досягнень у галузі:

- технології підземного видобутку руд в енергопорушених масивах складної структури;
- підземної геотехнології;
- комплексної технології, що включає традиційну камерну систему з закладкою і ПБВ металів зі скельних руд;
- теорії та практики вибухового руйнування твердих середовищ.

Також були використані методи механіки суцільних середовищ, математичної статистики та методи дослідження хвильових процесів за стандартними та новими методиками провідних фахівців розвинених гірничодобувних країн світу за участю авторів у цій галузі, зокрема авторів означених робіт [16].

## **Результати дослідження**

Системи вивільнення металів у блоках (ПБВ) застосовуються на місцях народження, що характеризуються достатньою активною пористістю та фільтраційною здатністю. Недоліком зазначеної системи ПБВ є відсутність обґрунтованих буровибухових параметрів, що забезпечують задану якість дроблення та технологічні умови, спрямовані на більш повне використання енергії вибухового руйнування, крім повільного підриву та підриву в стисненому середовищі. Крім того, не визначені стійкі параметри експлуатації блоків ПБВ, які без урахування управління енергією вибухового руйнування можуть призвести до порушення їх конструктивних елементів. В результаті чого одним із самих проблемних місць є складність досягнення заданої якості дроблення, а також вимагається висота зберігання руди в камері для подальшого

вищування металів і коефіцієнт розривання з урахуванням керування енергією вибухового руйнування скальної руди [17]. Схема вилуговування металів із проникаючих руд у природному заляганні через свердловину представлена на рис. 1. Позначено: 1 – вузол приготування розчину; 2 – свердловина для подачі розчину; 3 – свердловина для видачі продуктивного розчину; 4 – компресор; 5 – повітропровод для ерліфта; 6 – колектор продукційного розчину; 7 – відстійник; 8 – установка для переробки розчину. У нього подають розчинник, який, фільтруючись по покладах, вилуговує корисні компоненти і потім відкачується через інші свердловини. Особливістю свердловин є застосування труб з поліетилену. За цією технологією розроблені родовища України, зокрема «Девладівське», «Братське» і «Сафонівське» ДП «Схід ГЗК» у період із 1959 по 1984 роки. В даний час всі ділянки, розроблені технологічною схемою підземного вилуговування (ПВ), рекультивовані, а землі передані землекористувачу. Спеціалізована лабораторія веде моніторинг забруднення гідрогеологічного середовища в пробах води, відібраних через свердловини в зоні впливу зазначеного гірського об'єкта [18]. Схему підготовки рудних тіл до вилуговування на «Бикогірському» родовищі, Північний Кавказ без руйнування рудного масиву у ПБВ наведено на рис. 2. Зазначена технологія дозволила суттєво скоротити операції порівняно із традиційною системою розробки.

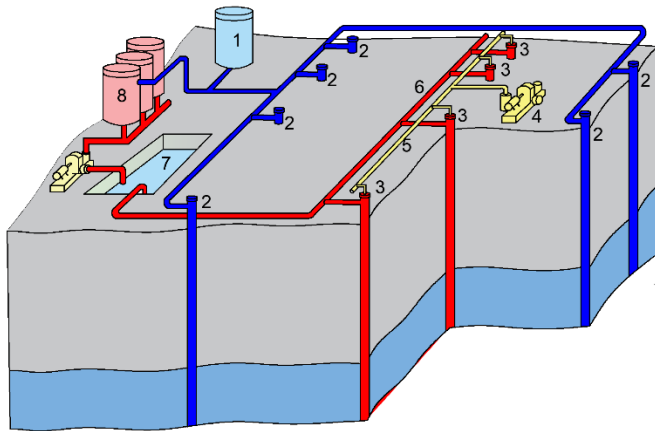


Рис. 1. Схема відпрацювання родовища вилуговуванням

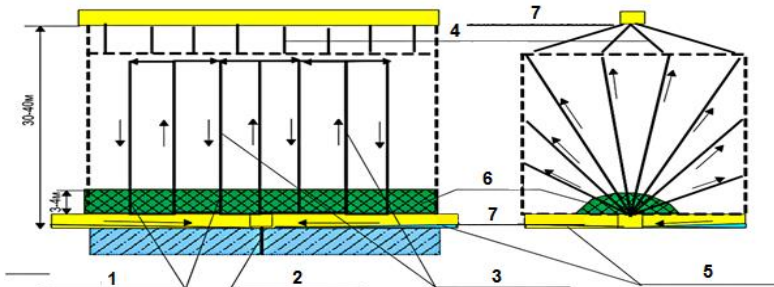


Рис. 2. Підготовка рудних тіл до ПБВ із проникаючих руд у природному заляганні через свердловини: 1, 2, 3, 4 – відповідно дренажні, перепускні, подаючі та зрошувальні свердловини; 5 – гідроізоляція; 6 – тампонаж; 7 – відкатний горизонт

Об'єднання можливостей підприємств, наприклад, свинцево-цинкового комбінату та ВАТ «Кавдоломіт» (Північний Кавказ), забезпечує доломітом, від повного виробничого циклу та видобутку сировини до реалізації продукції. Це підприємство має природоохоронну значущість, оскільки заповнення виробленого простору закладною сумішшю з урахуванням в'язучих із доломіту зменшить втрати руд під час відбійки.

Для отримання в'язучої фракції доломіту застосовують млини, в яких питома поверхня доломітів збільшується до 3000 см<sup>2</sup>/г, що підвищує активність в'язучих добавок на 20-30%. Одним з найкращих способів зниження кількості відходів радіоактивних речовин на поверхні землі, скорочення обсягів закладки та збільшення продуктивності підприємства в процесі випуску продукції є видобуток урану вилуговуванням під землею.

Балансові запаси уранових руд, локалізовані в осадових породах міцністю 4-6 за шкалою проф. М.М. Протодияконова (рис. 3), відпрацьовували на родовищі Північного Казахстану. Розміри блоку: довжина 23–27 м, ширина – 5 м, висота – 28 м. Верстатом НКР-100М пробурено 44 паралельних свердловини із нахилом по падінню рудного тіла і недобуром на 1,5 м. Заряджання свердловин здійснювалося гранулітом АС-8. Вибух – електричним способом, із інтервалом уповільнення між рядами 25 с. Загальна вага заряду – 4200 кг. Коефіцієнт розпушування – 1,12. Вилуговування тривало 6,5 місяців.

Для визначення повноти вилуговування блок був розкритий на 4 підповерхнях виробками. Якісне дроблення масиву відбулося не по всьому блоку. Інтенсифікацію вилуговування здійснено підриванням зарядів грануліту АС-4 у свердловинах. Після інтенсифікації за 4,5 місяці одержано металів у 1,22 раза більше, ніж за першу стадію вилуговування. Блок 2 мав розміри: довжина – 60 м, ширина 10 – 26 м, висота – 36 м. Для відбійки руди застосовувалися висхідні свердловини діаметром 85 мм. Вибух здійснювався із уповільненням 25, 30, 75 та 100 мс. Коефіцієнт розпушення руд – 1,23.

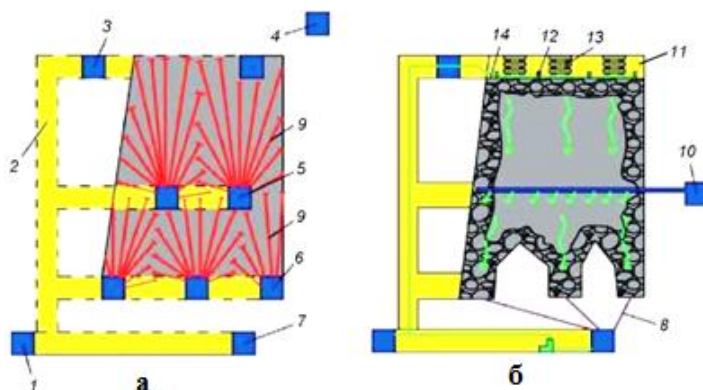


Рис. 3. Підземне блокове вилуговування металів із руд: а, б – відповідно, розбудування камерних запасів блоку і вилуговування відбитих і замагазинних руд в камері: 1 – штрек; 2 – вертикальна виробітка; 3 – штрек для зрошення; 4 – штрек вентиляційний; 5 – бурові штреки; 6 – дренажно-бурові штреки; 7 – дренажний штрек; 8 – дренажні свердловини; 9 – проміжний горизонт зрошення; 10 – проміжний горизонт зрошення; 11 – штрек для зрошення; 12 – верхнє підсікання; 13 – кріплення; 14 – зрошувальна система

На рудниках в минулому Радянського Союзу (СРСР), Співдружності Незалежних Держав (СНД), України, Північного Казахстану, Німеччини та інших розвинених гірничодобувних країн світу застосовують системи розробки з вилуговуванням металу з магазинованих у камері руд у промислових масштабах (рис. 4) [19].

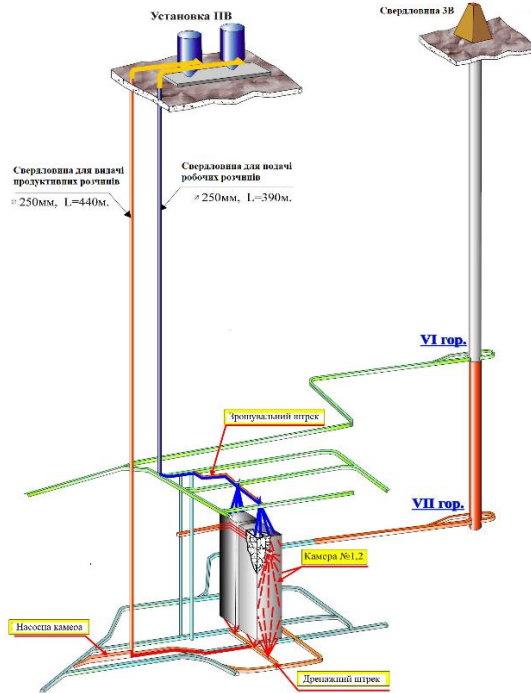


Рис. 4. Схема підземного блокового вилуговування металу з руд, замагазинованих у камерах на руднику «Глибокий»

Основними недоліками існуючих технологій ПБВ металів із магазинованих у камері руд є:

- трудомісткість технологічного процесу для створення умов ефективного вилуговування;
- необхідність транспортування гірничої маси та заповнення виробленого простору твердіючою сумішшю, формування штучного днища;
- відсутність обґрунтованих параметрів буропідричних робіт, що забезпечують задану якість дроблення руд та технологічних умов, та короткосповільненого підривання у затиснутому середовищі;
- не визначено також стійкі параметри блоків, які без урахування керування енергією вибухової руйнації можуть призвести до обвалення конструктивних елементів блоків;
- не обґрунтовано ефективної висоти вилуговування металів та коефіцієнт розпушування відбитих руд з урахуванням управління енергією вибухового руйнування.

Технічним завданням, для вирішення якого спрямована пропонується комбінована технологія, є підвищення ефективності процесу розробки рудних родовищ у поєднанні з ПБВ шляхом оптимізації параметрів експлуатаційних

блоків та створення умов управління енергією вибухового руйнування. Це забезпечує оптимальний гранулометричний склад гірничої маси та зниження витрат технологічних розчинів при вилуговуванні корисних компонентів.

### Теорія та практика буровибухової підготовки руд до підземного вилуговування металів

Здійснюють буріння свердловин та зарядку вибухової речовини, її короткоуповільнене підривання у затиснутому середовищі. Виконують проходку горизонту зрошення та днища для збирання продуктивних розчинів, частковий випуск відбитої на відрізу щілину руди. На підставі результатів багаторічних досліджень під час підземної розробки родовищ в енергопорушених масивах автори пропонують розрахункові формули щодо обґрунтування параметрів буровибухових робіт та безпечних параметрів камер із урахуванням ефективності ПБВ металів (табл. 1 та табл. 2).

Таблиця 1. Параметри буровибухових робіт при віяловому розташуванні свердловин для відбивання руди з підповерхових штреків (ортів)

Діаметр свердловин, $d_{св}$ мм	Відношення висоти підповерху до ширини камери, $h/b$	Коефіцієнт від $h/v$ , $K$	Коефіцієнт, $f$	Коефіцієнт тріщинуватості, $K_{тр}$	Коефіцієнт зближення свердловин, $m$	Лінія найменшого опору, $W$ , м	Відстань між кінцями свердловин, $a$ , м	Вихід гірничої маси з одного метра, $\lambda$ , м	Питома витрата на відбійку, $q$ , кг/м <sup>3</sup>
75	1,3	0,1	16	1,00	7,8	1,6	2,9	2,5	1,4
65	1,3	0,1	14	1,00	$\frac{2,1^*}{2,0}$	$\frac{1,44^*}{1,5}$	$\frac{3,0^*}{3,0}$	2,3	1,15

\* – у чисельнику параметри по номограмі, у знаменнику – для користувача.

Таблиця 2. Безпечні параметри камер для рудних родовищ

Найменування параметрів	Розрахункові формули
Довжина експлуатаційного блоку $l$ для досягнення заданої якості дроблення гірничої маси, м	$v_1 = v_0 + 2l_e v_1$
Ширина компенсаційного простору під час вибуху в затиску визначається шириною відрізної щілини $v_0$ і довжиною ділянки часткового випуску $l_e$ , обмеженим коефіцієнтом розпушення $1,15 > Kp < 1,2$ , м	$l = 2(K + m) + v_1$
Ефективна висота $h$ замагазинованої гірничої маси в ПБВ з урахуванням технологічних і гідродинамічних характеристик руд, що вилуговуються, м	$h = \frac{\theta \cdot t}{V \cdot \lambda}$

Примітка:  $K$ ,  $m$  – відповідно, розмір ділянок інтенсивного зіткнення відбитої гірської маси та вибухом ВР у затиску, м;  $v_1$  – розмір компенсаційного простору, м;  $\theta$  – режим зрошення, м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·час;  $t$  – час інтенсивного вилуговування, годин;  $V$  – витрата реагенту на 1 т руди, м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – щільність вилуговуючих руд, т/м<sup>3</sup>

Під час розробки системою підповерхових штреків допускається вихід свердловин за межі рудних тіл трохи більше 5% від загального обсягу бурових робіт у блоці. Зазначений допуск не поширюється на буріння в камерах при системі підповерхових ортів. В Україні рекомендовано до застосування варіант видобутку руд дробленням руд зарядами ВР та вилуговуванням металів в установках, розташованих у виробках експлуатаційного блоку.

Обґрунтування ефективного коефіцієнта розпушення дозволяє підвищити вилучення корисних компонентів із руд до економічно доцільних меж [20]. Це дозволило залучити до відпрацювання запаси некондиційної сировини та продовжити термін існування діючих шахт. Вилучення металу залежить від розміру шматка підірваної руди  $d_{cp}$  і ( $R^2 = 0,97$ ) і описується відповідним виразом (рис. 5).

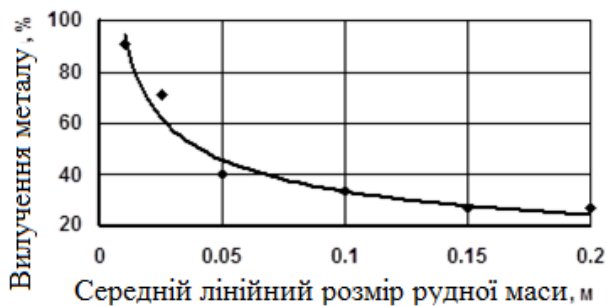


Рис. 5. Графік залежності вилучення металу від середнього лінійного розміру роздробленої вибухом вибухових речовин рудної маси

В умовах Мічуринського родовища ДП «СхідГЗК» (Україна) проведено дослідження кількісних параметрів процесу вилуговування уранових руд. Зменшення розміру шматка та збільшення площі руйнування масиву сприяють раціональному використанню кінетичної енергії вибуху.

### Комбінована геотехнологія видобутку руд та вилуговування металу

Останнім часом у розвинених гірничодобувних країнах світу знаходять застосування комбіновані геотехнології ПБВ металів із рудної сировини (рис. 6 та рис. 7). При комбінуванні технологій багаті руди видають на поверхню та переробляють на заводі, а бідні вилуговують у підземних блоках та штабелях з отриманням металів, будівельної сировини, знесоленої води, газів, кислот та низькосортних лугів. Такі технології ефективні, коли 40% багаті руди видається на поверхню, а 60% руди вилуговується під землею. При однаковій продуктивності підприємства з гірничої маси продуктивність з металу підвищується вдвічі. Вилучення металів вилуговуванням може застосовуватися на всіх етапах розробки родовища.

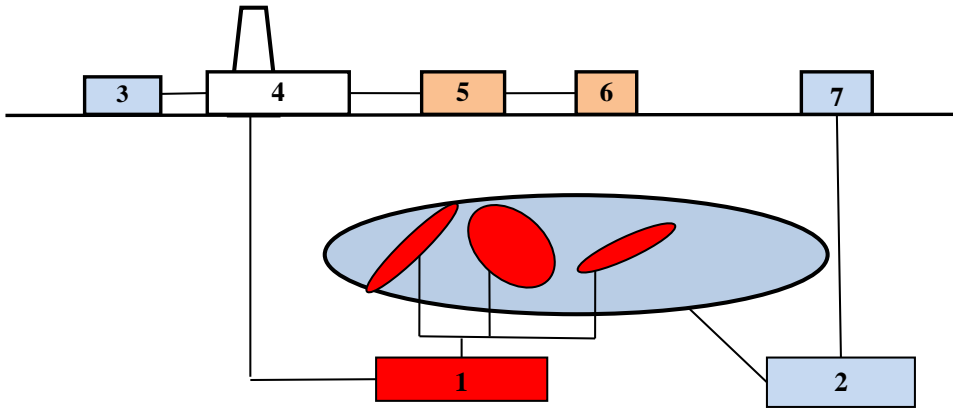


Рис. 6. Комбінована розробка рудного родовища (схема): 1, 2 – відповідно, багаті та бідні (за вмістом металів) руди; 3 – комплекс купного вилюговування бідних та позабалансових руд (за вмістом металів); 4, 5 – відповідно, рудоконтрольна та збагачувальна станція (РКС) та фабрика (РОФ); 6 – закладний комплекс; 7 – цех приготування розчинів для вилюговування

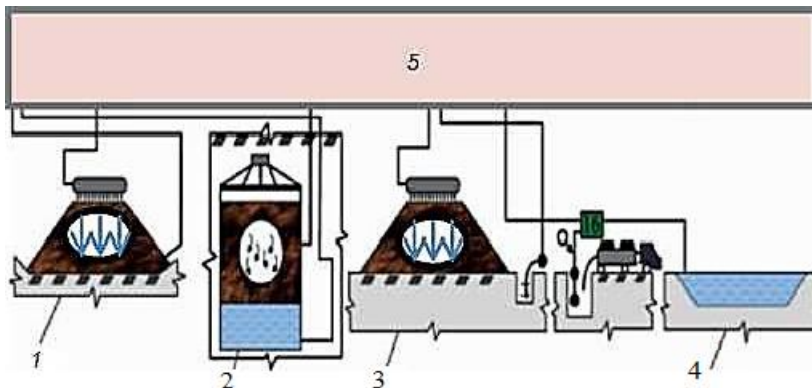


Рис. 7. Купне вилюговування металів на земній поверхні (схема): 1 – штабель купного (у штабелях) вилюговування; 2 – фотоелектричний блок; 3 – відвал; 4 – ставок; 5 – цех обробки розчину

Запаси Мічурінського родовища, значна частина якого залягає під річкою Інгул, локалізовані в крутопадаючих рудних тілах. ПБВ освоюються за таких умов:

- стійкі та середньої стійкості крутопадаючі рудні тіла, що залягають у скельних кислотно-водостійких вмштуючих породах;
- балансові, бідні та позабалансові руди;
- зони тріщинуватості в навколблоковому просторі слаборозвинені, а присутність карбонатів не більше 2-4%;
- рудні поклади мають позабалансові ореоли за відсутності глинистих включень.

Сейсдобезпечна маса заряду на одне уповільнення визначається згідно з формулами, наведеними в табл. 3.



Таблиця 3. Сейсмобезпечна маса заряду на одне уповільнення ( $Q$ ), кг

Найменування параметрів	Розрахункові формули
для гірничого масиву;	$Q = \left[ \frac{U_d}{K} \right]^{3/n} \cdot r^3$
для закладного масиву: при нормальному розташуванні віялових зарядів;	$Q = \left( \frac{2\sigma_{p.z.} \cdot g \cdot 1000}{85 \cdot \gamma \cdot C_p} \right)^{2,34} \cdot r^3$
при паралельному розташуванні віялових зарядів	$Q = \left( \frac{\sigma_{сжс} \cdot g}{0,290 \cdot \gamma \cdot C_p} \right)^{1,44} \cdot r^3$

Примітка. У формулах позначено:  $U_d$  – допустима швидкість зміщення для різних підземних об’єктів і оголень камер ( $U_d = 24-75$  і залежить від категорії та термінів служби об’єктів, що охороняються), см/с;  $K$  – коефіцієнт, що враховує властивості середовища (гірські та штучні масиви, розломи та ін.), що проводить сейсмічні коливання ( $K = 100-600$ ), од.;  $n$  – показник ступеня згасання сейсмовибухових хвиль ( $n = 1,85-2,1$ );  $C_p$  – швидкість поширення поздовжніх хвиль у закладному масиві, см/с. При  $\sigma_{сжс} = 3,0; 6,0$  і  $8,5$  МПа, показник  $C_p = 22 \cdot 10^4; 25 \cdot 10^4$  та  $26 \cdot 10^4$  см/с, відповідно;  $r$  – відстань між камерами (від епіцентру вибуху до оголення), м;  $\sigma_{p.z.}$ ,  $\sigma_{сжс}$  – відповідно, межа міцності закладки на розтягування та стиск, МПа;  $g$  – питома витрата ВР на відбійку руди, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma$  – щільність руди, т/м<sup>3</sup>

Стійкість оголення залежить від величини еквівалентного прольоту гірського масиву та закладки, що твердіє. Розрахунки геометричних параметрів камер із заданими геомеханічними характеристиками виконані, виходячи з таких умов: руда і породи середньої тріщинуватості, міцність за шкалою проф. М.М. Протодияконова 12–18, кут падіння покладів більше 50°, потужність рудних тіл 3–15 м.

Відмінною особливістю наведеної вище технології є те, що вилуговуючі розчини подають з сорбційної колони, розміщеної в гірничих виробках горизонту зрошення в безпосередній близькості до експлуатаційного блоку. Видачу продуктивних розчинів здійснюють із сорбційної колони, розміщеної в гірничих виробках горизонту зрошення, у вагонетках на денну поверхню і далі в цистернах на ГМЗ.

Робочі розчини в цьому режимі з горизонту зрошення (горизонт 210 м) подають на поверхню замаганізованої руди перфорованими поліетиленовими трубами діаметром 16 мм в 48 свердловинах, пробурених з горизонту 210 м в камеру блоку. Зрошення проводиться періодично по 30 хвилин при паузах 2–3 години. Під час пауз створюються сприятливі умови для аерації рудного матеріалу та розвитку окисних процесів, що сприяють переходу металу з важкорозчинної чотиривалентної форми в легкорозчинну шестивалентну. Щільність зрошення під час експерименту змінювалася від 9 л/м<sup>2</sup> годину до 16 л/м<sup>2</sup> годину, що забезпечувало інфільтраційний режим зрошення.

Забезпечення нормативного розпушення руд дозволяє підвищити їх витяг до економічно доцільних меж. Дослідний блок ПБВ мав параметри: висота – 20 м; ширина – 16 м; довжина – 24 м (рис. 8).

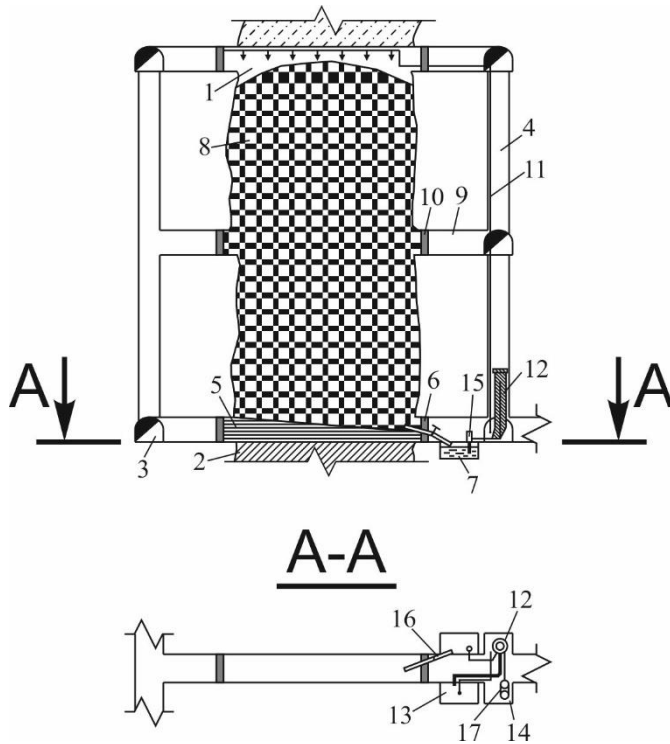


Рис. 8. Технологічна схема вилуговування металу із скельних руд в установках, розміщених у гірничих виробках: 1 – камера; 2 – рудне тіло; 3, 4 – виробітки; 5 – ізолюючий матеріал; 6 – ізолююча перемичка; 7 – ємність; 8 – магазинована руда; 9 – вироблення; 10 – ізолююча перемичка; 11 – трубопровід; 12 – апарати для переробки продуктивних розчинів; 13 – ємність для приготування розчину; 14 – ніші; 15 – насоси; 16 – труба; 17 – апарат десорбції

Технологія дослідної ділянки ПБВ включає такі операції:

- закислення відбитої руди в дослідному блоці;
- зрошення замагазинованої руди розчинами сірчаної кислоти;
- сорбцію металу з продуктивних розчинів на смолу (регенерований аніоніт марки АМП);
- інтенсифікацію процесів вилуговування вибухами, що струшують;
- відкачування через головний водовідлив шахти надлишку розчинів після сорбції на обладнанні для очищення шахтних вод (УОШВ);
- нейтралізацію та промивання відпрацьованої рудної маси розчином вапна та шахтною водою.

Вилуговування забезпечується технологічним обладнанням, що включає: поверхневий вузол; технічний комплекс прийому та видачі кислоти та смоли; підземний вузол; технологічний комплекс вилуговування та сорбції. Сірчана кислота із залізничної цистерни, яка використовується як витратна ємність, періодично насосом через бурак (ємність) та зливальний пристрій закачується в транспортну вагонетку-цистерну. Вагонетка-цистерна з кислотою опускається по стволу на горизонт 210 м. Кислота, відповідно до технологічного регламенту, дозується на горизонті 240 м у зумпф продуктивних розчинів – на приготування розчину, що вилуговує.

Періодично насичена смола із сорбційної колони вивантажується в спеціальну вагонетку-цистерну і піднімається на поверхню, де за допомогою «транспортної» води від насоса завантажується самопливом в автоцистерну об'ємом 6,4 м<sup>3</sup> і транспортується для регенерації на гідрометалургійний завод. Відрегенована смола завантажується у вагонетку з автоцистерни самопливом – за допомогою оборотної води, яка під час завантаження дренає з вагонетки чи автоцистерни через патронний фільтр. На відкатувальному горизонті смола подається з вагонетки-цистерни в сорбційну колону ерліфтом.

Після завершення вилуговування, промивання та нейтралізації блоку в примикаючих виробках горизонтів споруджуються ізолюючі та вентиляційні перемички для запобігання еманції радону та інших шкідливих речовин. Вилужена руда після доставки з блоку до вагонів і транспортування на поверхню була ретельно відгрохована через мінливі сита на рудозбагачувальній фабриці (РЗФ), зібрана і досліджена фракційно (табл. 4).

Таблиця 4. Вміст та вилучення металу за класами крупності у вилуженій руді

Крупність, мм	-200+150	-150+100	-100+50	-50+25	-25+0
Вихід класу, %	8,8	17,0	27,0	35,3	11,9
Вміст металу, %	0,038	0,038	0,030	0,025	0,014
Вилучення металу, %	26,3	26,3	33,3	40,0	71,4

При комбінуванні геотехнологій багаті руди видають на поверхню і переробляють на гідрометалургійному заводі (ГМЗ), інші – вилуговують у шахтних умовах ПБВ і штабелях на земній поверхні. Об'єм руди для підземного вилуговування:

$$Q_y = Q_{з.м.} - Q \frac{M^1 \cdot K_p}{\beta \cdot (K_p - 1)} \cdot \gamma, \quad (1)$$

де  $Q_{з.м.}$  – запаси родовища, м<sup>3</sup>;  $Q$  – обсяг руди, що видобувається з надр, м<sup>3</sup>;  $M$  – кількість металу, що видається на поверхню, т;  $\beta$  – вміст металу в руді, частки од.;  $\gamma$  – щільність руд, т/м<sup>3</sup>;  $K_p$  – коефіцієнт розпушення, одиниць.

Техногенними родовищами є хвости збагачення та гірничо-металургійного переділу. Сумарна цінність металів у відходах нерідко перевищує цінність ідентифікованих запасів у надрах. Використання геотехнологій з вилуговуванням металів у певних умовах може забезпечити прибуток та зайнятість населення регіону. При порівнянних витратах з надр витягується більше металу і товарного продукту. У розчин витягуються практично всі метали, що містяться в хвостах, що радикально підвищує видобуту цінність продуктів переробки.

### Сейсмічна безпека

Критерієм рівня сейсмовибухового струсу є швидкість коливання, допустиме значення якої варіюється від 0,2 до 10 см/с і визначиться за формулою М.А. Садовського [21]:

$$V = K \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^n, \quad (2)$$

де  $V$  – швидкість зміщення порід, см/с;  $n$  – показник загасання коливань;  $K$  – інтенсивність струсів, що характеризує сейсмічність геологічного району та технологію вибухових робіт, од.;  $Q$  – маса заряду вибухової речовини, кг;  $R$  – відстань від епіцентру вибуху до точки розміщення датчика, м.

Показник загасання сейсмічних коливань ( $n$ ) та коефіцієнт пропорційності ( $K$ ) визначаються відповідно до вимог Державного стандарту України ДСТУ 4704:2008 «Проведення промислових вибухів. Норми сейсмічної безпеки». Швидкості  $V_1$  та  $V_2$  заміряли у двох точках датчиками сейсмографа типу Blast Mate Series III (Канада) на поверхні при відпрацюванні запасів експлуатаційного блоку (рис. 9) [22].



Рис. 9. Сейсмограф Blast Mate Series III (загальний вигляд)

Розрахунками визначено сейсмічно безпечну масу заряду вибухової речовини, що забезпечує необхідне дроблення гірничорудної маси та сейсмічну безпеку об'єктів у зоні впливу підземних вибухів при відпрацюванні приповерхневих запасів блоками ПВ на околицях річки Інгул (рис. 10).

Значення швидкостей  $V_1$  і  $V_2$  сейсмічних коливань в районі об'єктів, що охороняються, згідно з уточненою формулою М.А. Садовського (2) для вирішення для двох точок вимірювань:

$$V_1 = K \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_1} \right)^n; \quad V_2 = K \cdot \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_2} \right)^n. \quad (3)$$

Показник  $n$  і коефіцієнт  $K$  для двох точок розраховуються згідно з формулами:

$$n = \frac{\ln \frac{V_2}{V_1}}{\ln \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{3} \cdot \ln \frac{Q_2}{Q_1}}, \quad n = \frac{\ln V_2 - \ln V_1}{\ln R_1 - \ln R_2 + \frac{1}{3} \cdot (\ln Q_2 - \ln Q_1)}. \quad (4)$$



Рис. 10. Схема установки датчиків сейсмографа Blast Mate Series III на поверхні під час відпрацювання блоками ПВ:  $T_1$ ,  $T_2$  – точки сейсмічних вимірів від вибухів

Коефіцієнт, що залежить від стану гірського масиву, наявності тріщин та розломів, закладеного та незакладеного виробленого простору, визначається згідно з виразами:

$$K = v_1 \left( \frac{R_1}{\sqrt[3]{Q_1}} \right)^n = v_1 \cdot Q^{-\frac{n}{3}} \cdot R_1^n \quad (5)$$

*Приклад.*

*Вихідні дані:*

$R_1 = 377 \text{ м}$	$R_2 = 334 \text{ м}$
$Q_1 = 96,4 \text{ кг}$	$Q_2 = 96,4 \text{ кг}$
$v_1 = 0,042 \text{ см/с}$	$v_2 = 0,054 \text{ см/с}$

*Рішення.* Згідно з паспортом вимірювань показник сейсмічних коливань ( $n$ ), що визначається згідно з виразом (4), складе:

$$n = \frac{\ln \frac{v_1}{v_2}}{(\ln R_1 - \ln R_2)} = \frac{\ln \frac{0,042}{0,054}}{\ln 377 - \ln 334} = \frac{0,251}{0,12} = 2,074.$$

Знаючи величину  $n$ , знаходимо значення для конкретного масиву та блоку по першій точці згідно з формулою (5):

для першої точки: 
$$K = v_1 \cdot Q_1^{-\frac{n}{3}} \cdot R_1^n = \frac{0,054 \cdot 334^{2,074}}{96,4^{0,69}} = 395,94 ,$$

для другої точки: 
$$K = v_2 \cdot Q_2^{-\frac{n}{3}} \cdot R_2^n = \frac{0,042 \cdot 377^{2,074}}{96,4^{0,69}} = 395,88 .$$

Показник  $n$  та коефіцієнт  $K$  для орієнтовного розрахунку прийняті рівними ( $n = 2$  і  $K = 500$ ). Уточнення показників  $n$  та коефіцієнта  $K$  дозволить коригувати масу сейсмобезпечних зарядів ВР [23, 24].

Подальше вдосконалення вибухових робіт при підповерховій відбійці руд необхідно здійснювати шляхом застосування:

- внутрішньовіялового уповільнення;
- зустрічного ініціювання зарядів;
- застосування свердловин верхнього поверху для утворення екрану;
- зменшення  $W$  для першого віяла, що відбивається на відрізу щілину (перше віяло дає найбільшу кількість негабариту);
- застосування неелектричних систем ініціювання ВР (Шосткинський «Імпульс», ПРИМА-ЕРА Павлоградського хімзаводу та інші);
- застосування електронних систем ініціювання;
- застосування емульсійних ВР.

### Ефективність отриманих результатів

Прибуток від залучення некондиційних запасів у виробництво забезпечується за рахунок збільшення обсягів видобутку і випуску попутної продукції [25, 26]. Економічна ефективність результатів визначена на підставі даних про фактичну собівартість металу на ПБВ:

$$E_{\text{real}} = (N_{\text{blok}} \times T_{\text{on}} \times T_{\text{of}}) \times C_{\text{blok}} - (N_{\text{trad}} \times T_{\text{trad}}) \times C_{\text{trad}}, \text{ грошових од.} \quad (6)$$

де  $N_{\text{blok}}$  – кількість металу в замагазинованій руді ПБВ, кг;  $T_{\text{on}}$  – вилучення металу на іонообмінну смолу, частки од.;  $T_{\text{of}}$  – вилучення металу з іонообмінної смоли, частки од.;  $C_{\text{blok}}$  – собівартість 1 кг металу, одержаного з ПБВ, грошових од.;  $N_{\text{trad}}$  – кількість металу, що знаходиться в ідентичному рудному блоці, що відпрацьовується традиційною технологією, кг;  $T_{\text{trad}}$  – витяг металу з руди, здобутого з блоку традиційною технологією, частки од.;  $C_{\text{trad}}$  – собівартість 1 кг металу, отриманого з руди блоку, відпрацьованого традиційною технологією, грошових од.

Протокол та сейсмометричний звіт сейсмографа BlastMate Series III з амплітудно-частотними характеристиками сейсмічних коливань ґрунту біля фундаменту будівель наведено на рис. 11.

Економічна ефективність від впровадження рекомендованої технології:

$$\{P - C_{\text{blok}}\} \times R \times K \times T_1 \times T_2 \times 20, \text{ грошових од. /год,} \quad (7)$$

де  $P$  – ціна 1 кг металу в концентраті, грошових од.;  $R$  – експлуатаційні запаси убогої руди, т;  $K$  – вміст металу в руді, що добувається, умовних од.;  $T_1$  – вилучення металу шахтного ПБВ, частки од.;  $T_2$  – вилучення металу заводське із шахтного ПБВ на ГМЗ, частки од.; 20 – прийнята кількість років відпрацювання запасів бідної, за змістом корисного компонента, руди (табл. 5).

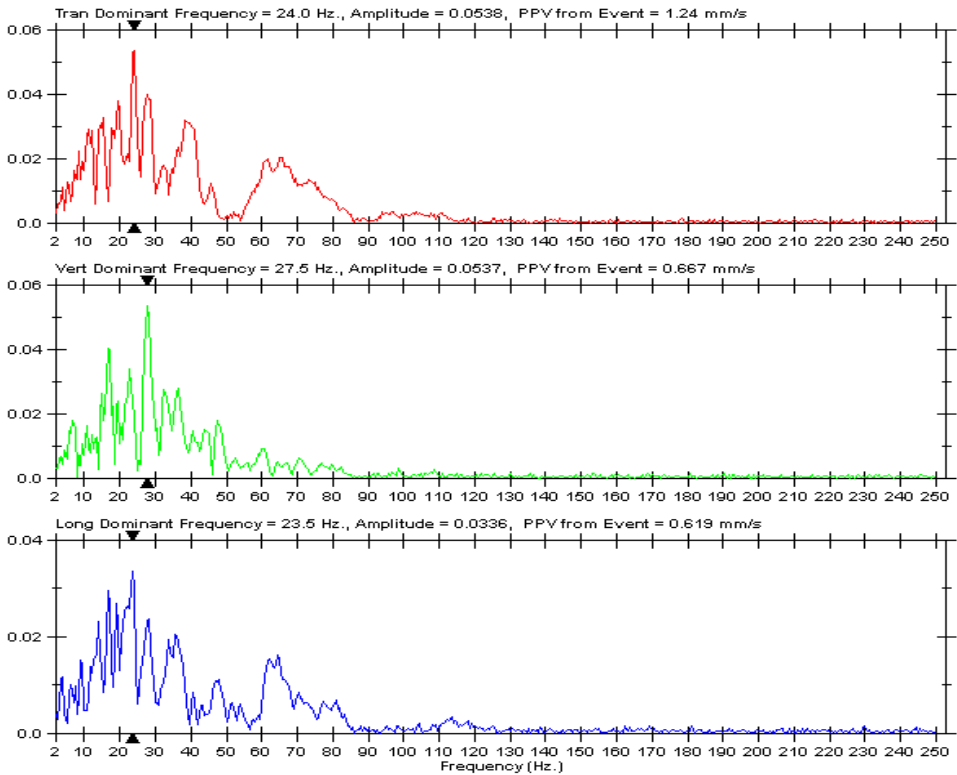


Рис. 11. Протокол та сейсмометричний звіт сейсмографа BlastMate Series III з амплітудно-частотними характеристиками сейсмічних коливань ґрунту біля фундаменту будівель

Таблиця 5. Обсяги виробництва

Найменування	Показники
Підземне вилуговування, т	28 284
Вміст металу, ум. од.	0,038
Кількість металу в руді, кг	10 748
Вилучення на смолу, %	70,0
Вилуговуючий розчин ПБВ, кг	7 524
Вилучення зі смоли, %	99,5
Продуктивний розчин ПБВ, кг	7 486

Впровадження технологій вилуговування покращує економічні та екологічні показники гірничого виробництва [27, 28].

### Аналіз результатів досліджень

Дослідженнями обґрунтовано параметри та обрано раціональні схеми підготовки очисних блоків при комбінованому видобутку руд традиційним способом та вилуговуванням металів ПБВ. Це забезпечить охорону та раціональне використання надр, підвищення економічної ефективності.

Переваги блочного вилуговування: відсутні витрати на окремі операції порівняно з традиційною технологією видобутку та переробки руди, а саме:

1) під час видобутку:

- вторинне дроблення та випуск руди;
- внутрішньошахтні перевезення руди;
- видача руди на поверхню;
- дроблення та збагачення руди;
- закладка виробленого простору;
- завантаження в залізничні вагони та перевезення руди на ГМЗ;

2) під час переробки на ГМЗ:

- навантаження руди;
- подрібнення руди;
- вилуговування;
- сорбція;
- регенерація смоли;
- складування хвостів.

Для нейтралізації та зниження забруднень гідрогеологічного середовища вилуговуваними та продуктивними розчинами та важкими металами в зоні впливу ПБВ, рекомендовано промивання відпрацьованої рудної маси та обробка розчином вапна та шахтною водою через свердловини для подачі вилуговувальних розчинів (зрошувальна система). Для вирішення гідроекологічних завдань рекомендовано організувати постійний моніторинг забруднення підземних вод через спостережні свердловини, що пробурені в днищі експлуатаційного блоку та знаходяться в контакті з рудним тілом, а також зон тріщинуватості та гідрогеологічного розриву порід у зоні впливу ПБВ [29, 30].

Вимагають особливої уваги питання стійкості виробок горизонту зрошення, розташованого у районі інтенсивного впливу відпрацьованих блоків. Рудний масив у поперсі 197–210 м ослаблений існуючими до підготовки блоків до ПБВ нарізними та очисними виробками, а також мережею свердловин створеної системи зрошення. У цих виробках було організовано систематичний контроль за їх стійкістю та характером напружено-деформованого стану приконтурного масиву геофізичними методами та приладами (геомеханічний моніторинг). Негативним фактором є наявність значної кількості піску та сміття у відрегенованій смолі на ГМЗ. Згодом було прийнято рішення щодо монтажу на ГМЗ автономного вузла регенерації смоли для дослідних ділянок ПБВ.

## Висновки

Рекомендовано технологічні операції формування відрізних щілин та компенсаційних просторів для забезпечення оптимального розпушування замагазинованої руди за умов вилуговування руд та стійкості оголень масивів. Це забезпечується за коефіцієнта розпушення  $1,15 > Kp < 1,2$  та конструктивних стійких параметрів камер: висота замагазинованої руди – 20 м; ширина – 16 м; довжина – 24 м.

Встановлено вилучення металу  $\xi$ , %, яке суттєво залежить від середнього лінійного розміру шматка підірваної руди  $d_{cp}$  із високим ступенем достовірності ( $R^2 = 0,97$ ). Відмінною особливістю методології визначення



параметрів руйнування скельних руд із заданою якістю дроблення для вилуговування є знаходження необхідної енергії вибуху з урахуванням граничної енергоємності дроблення гірських порід.

На підставі дослідно-промислових випробувань відпрацювання дослідного блоку показано, що найбільш інтенсивне інфільтраційне вилуговування відбувається при класі крупності рудних шматків  $-100+0$  мм. Рекомендується вихід цієї фракції в руді, що відбивається, близько 90%. Менш інтенсивно і триваліше витягуються метали з фракцій  $-200+100$  мм.

Зазначено, що за час експерименту в розчин переведено близько 54% запасів металу, сировинна база збільшена у 1,4–1,6 рази. Повнота вилуговування металів залежить від якості дроблення руди, рівномірності її розподілу за щільністю в зруйнованому стані та умов, у тому числі: мінералізація, структура, пористість руди, коефіцієнт дифузії, температура, концентрація робочих розчинів тощо.

Показано, що для нейтралізації та промивання відпрацьованої рудної маси її слід обробляти розчином вапна та шахтною водою через свердловини для подачі вилуговувальних розчинів (зрошувальна система). Охорону гідрогеологічного середовища здійснювати шляхом замулювання глинистим розчином днища камери зі збирання продуктивних розчинів. Організувати моніторинг підземних вод через спостережні свердловини, пробурені в днищі експлуатаційного блоку та до контактів з рудним тілом, а також зон тріщинуватості та гідрогеологічного розриву порід.

## Перспективні дослідження

Запропоновано здійснювати буріння спостережних свердловин у зоні впливу ПБВ для контролю за зміною забруднення гідрогеологічного середовища та проведення відповідного моніторингу. Для зниження радону провітрювання шахтного поля слід здійснювати з використанням вентиляційних колекторів, а розрахунок кількості повітря для провітрювання робочих ділянок шахти проводити з урахуванням забруднень від ПБВ відповідно до галузевих вимог «Норм радіаційної безпеки України» (НРБУ-97).

За якістю гідрогеологічного середовища у зоні впливу ПБВ продовжити дослідження на основі даних гідрогеологічного моніторингу забруднень підземних вод. Автори вважають за доцільне спорудження напівактивних водопроникних хімічно активних бар'єрів (ВХАБ) та застосування біологічних технологій під час ПБВ шляхом замулювання глинистим розчином днища камери зі збору продуктивних розчинів.

Здійснювати також наукове обґрунтування та розробку профілактичних заходів щодо мінімізації негативних наслідків на здоров'я людини від дії важких металів та радіаційних факторів з урахуванням особливостей їх поєданого впливу на населення та робітників уранодобувної та гірничо-металургійної промисловості.

## REFERENCES

1. Aben, E., Markenbayev, Zh., Khairullaev, N., Myrzakhmetov, S., & Aben, Kh. (2019). Study of change in the leaching solution activity after treatment with a cavitator. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 114–120. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.114>

2. Bondarenko, V., Kovalevs'ka, I., Svystun, R., & Cherednichenko, Yu. (2013). Optimal parameters of wall bolts computation in the united bearing system of extraction workings frame-bolt support. *Annual Scientific-Technical Colletion – Mining of Mineral Deposits*, 5-9 [in Ukrainian].
3. Dobycha i pererobotka uranovyh rud [Mining and processing of uranium ores]. Monografija. Pod obshej redakciej A.P. Chernova (2001). Kiev: «Adef–Ukraina» [in Ukrainian].
4. Kelly, B. (2013). Stress analysis for boreholes on department of defense lands in the western united states: a study in stress heterogeneity. *Proceedings, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University* (pp. 139–150). Stanford: Stanford University.
5. Kalinichenko, V., Dolgikh, O., Dolgikh, L., & Pysmennyi, S. (2020). Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles. *Mining of Mineral Deposits*, 14(4), 31-39. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.031>
6. Kalinichenko, O.V. (2020). Development of the scientific foundations of the management of the stress-strain state of the massif during the formation of underground workings: Diss. doc. technical Science: 05.15.02 Kalinichenko O.V. Dnipro [in Ukrainian].
7. Kucha, P.M. (2013). Justification of the technology and parameters of underground mining operations during block leaching of uranium from solid ores. *Sustainable development of industry and society: international science and technology conf.* (May 22-25, 2013) (vol. 1, pp. 26–27). Kryvyi Rih: DVNZ "KNU" [in Ukrainian].
8. Lyashenko, V.I., Topolny, F.P., & Lisova, T.S. (2011). Environmental safety of uranium production. Kirovohrad: "CODE" publishing house [in Ukrainian].
9. Lyashenko, V., Topolnij, F., & Dyatchin, V. (2019). Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology Audit and Production Reserves* 5(3(49)):33-40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.184940> [in Ukrainian].
10. Lyashenko, V., Khomenko, O., Topolnij, F., & Golik, V. (2020). Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(3(51)), 17–24. doi:10.15587/2312-8372.2020.195946 [in Ukrainian].
11. Lyashenko, V., Khomenko, O., Golik, V., Topolnij, F., & Helevera, O. (2020). Substantiation of environmental and resource-saving technologies for void filling under underground ore mining. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(3(52)), 9–16. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.200022> [in Ukrainian].
12. Lyashenko, V., Khomenko, O., Topolnij, F., & Helevera, O. (2020). Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*, 3(3(53)), 4–11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897>
13. Lyashenko, V., Khomenko, O., Chekushina, T., Dudar, T., & Topolnij F. (2021). Substantiation of efficiency and environmental safety of leaching metals from ore: ways of development and prospects. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (3 (59)), 19–26. <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2021.235288> [in Ukrainian].
14. Lyashenko, V., Andreev, B., & Dudar, T. (2022). Substantiation of mining-technical and environmental safety of underground mining of complex-structure ore deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 16(1), 43-51. <https://doi.org/10.33271/mining16.01.043> [in Ukrainian].
15. Lyashenko, V. I., Dudar, T. V., Stus, V. P., & Shapovalov, V. A. (2024). Justification of efficiency and subsoil protection during underground development of ore deposits using traditional technologies in combination with metals leaching. *Mineral resources of Ukraine*, 2, 69-77. (in Ukrainian). [Ляшенко, В. І., Дудар, Т. В., Стус, В. П., & Шаповалов, В. А. (2024). Обґрунтування ефективності та охорони надр при підземній розробці рудних родовищ традиційними технологіями в комбінації із вилуговуванням металів. *Мінеральні ресурси України*, (2), 69-77]. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.2.69-77>
16. Lyashenko, V. I., Dudar, T. V., Oliynyk, T. A., & Shapovalov, V. (2024). Justification of the effectiveness of subsoil protection and environmental safety during the development of near-surface reserves of ore deposits. *Mineral resources of Ukraine*, (3), 78-85.

- <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.78-85> (in Ukrainian). [Ляшенко, В. І., Дудар, Т. В., Олійник, Т. А., & Шаповалов, В. А. (2024). Обґрунтування ефективності охорони надр та екологічної безпеки під час розробки приповерхневих запасів рудних родовищ. *Мінеральні ресурси України*, (3), 78-85]. <https://doi.org/10.31996/mru.2024.3.78-85>.
17. Malanchuk, Z., Korniienko, V., Malanchuk, Ye., Soroka, V., & Vasylchuk, O. (2018). Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*, 12(2), 76-84. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.076> [in Ukrainian].
18. Mac Carthy, J., Nosrati, A., Skinner, W., & Addai-Mensah, J. (2016). Atmospheric acid leaching mechanisms and kinetics and rheological studies of a low grade saprolitic nickel laterite ore. *Hydrometallurgy*, 160, 26–37.
19. Onika, S.G., Rysbekov, K.B., Aben, E.K., & Bahmagambetova, G.B. (2020). Leaching rate dependence on productive solution temperature. *Vestnik KazNRTU*, 142(6), 700-705. <https://doi.org/10.51301/vest.su.2020.v142.i6.122>.
20. Polak, C. (2014). International Symposium on 23–27 June 2014 Vienna, Austria Uranium Raw Material for the Nuclear Fuel Cycle: Exploration, Mining, Production, Supply and Demand, Economics and Environmental Issues. International Atomic Energy Agency (pp. 8–9). Retrieved from <http://www-pub.iaea.org/iaeameetings/46085/>
21. Stupnik, M.I., Fedko, M.B., Pysmennyi, S.V. et al. (2018). Problems of discovery and preparation of ore deposits in the deep horizons of the mines of Kryvbas. *Bulletin of the Kryvorizk National University: Coll. of science works*, 47, 3–8. DOI: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8 [in Ukrainian].
22. Reiter, K., & Heidbach, O. (2014). 3-D geomechanical–numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*, 5, 1123–1149.
23. Sadovskij, M.A. (1997). *Геофизика і фізика всрива* [Geophysics and physics of explosion]. Moscow: Nedra (in Russ.). [Садовский, М.А. (1997). *Геофизика и физика взрыва*. М.: Недра].
24. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. (2015). Vienna: IAEA. [Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. (2015). Вена: МАГАТЭ].
25. Rysbekov, K., Huayang, D., Kalybekov, T., Sandybekov, M., Idrisso, K., Zhakypbek, Y., & Bakhmagambetova, G. (2019). Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation. *Mining of Mineral Deposits*, 13(3), 40-48. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.040>
26. Stupnik, M., Kalinichenko, O., Kalinichenko, V., Pysmennyi, S., & Morhun, O. (2018). Choice and substantiation of stable crown shapes in deep-level iron ore mining. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 56-62. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.056>
27. Techno-economic Comparison of Geological Disposal of Carbon Dioxide and Radioactive Waste. *Marketing and Sales Unit, Publishing Section International Atomic Energy Agency*. Vienna, 2014. Pp. 246. Retrieved 19.08.2016 from <http://www.iaea.org/books>
28. Chetveryk, M., Bubnova, O., & Babiy, K. (2017). The rate of deformation development in the rock massif on the basis of surveying monitoring on the earth surface. *Mining of Mineral Deposits*, 11(1), 57-64. <https://doi.org/10.15407/mining11.01.057>
29. Ghorbani, Y., Franzidis, J.-P., & Petersen, J. (2016). Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A Review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 37 (2), 73–119.
30. Zhanchiv, B., Rudakov, D., Khomenko, O., & Tsendzhav, L. (2013). Substantiation of mining parameters of Mongolia uranium deposits. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 10–18.

Стаття надійшла до редакції 13.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 12.08.2024

The article was received 13.03.2024 and was accepted after revision 12.08.2024

Автори висловлюють щирю подяку за участь у роботі: Тархіну Ю. М., Худошиній Н. О., Ляшенко Л. А., Дудченку А. Х., Ткаченку А. А. (ДП «УкрНДППромтехнології», Україна), Пухальському В. М., Кучі П. М., Копаневу А. В., Сінчуку В. В., Меркулову В. А. (ДП «СхідГЗК»), а також цінні і конструктивні зауваження та рекомендації – рецензентам статті.

**Ляшенко Василь Іванович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного відділу, Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектно-розвідувальний інститут промислової технології»

**Адреса робоча:** б-р Свободи, 37, м. Жовті Води, 52204, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-4179> **e-mail:** [vilyashenko2017@gmail.com](mailto:vilyashenko2017@gmail.com)

**Дудар Тамара Вікторівна**

доктор технічних наук, професор, завідувачка кафедри екології, Національний авіаційний університет

**Адреса робоча:** просп. Любомира Гузара, 1, м. Київ, 03058, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3114-9732> **e-mail:** [dudar@nau.edu.ua](mailto:dudar@nau.edu.ua)

**Стусь Віктор Петрович**

доктор медичних наук, професор, професор кафедри хірургії № 1 та урології Дніпровського державного медичного університету

**Адреса робоча:** вул. Володимира Вернадського, 9, м. Дніпро, 49044, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4539-8126> **e-mail:** [viktor.stus@gmail.com](mailto:viktor.stus@gmail.com)

**Шаповалов Віктор Анатолійович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки, Криворізький національний університет

**Адреса робоча:** вул. Віталія Матусевича, 11, м. Кривий Ріг, 50000, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5965-2869> **e-mail:** [Shapovalov@knu.edu.ua](mailto:Shapovalov@knu.edu.ua)

УДК 502.175:[502.3+502.51](477+4-6ЄС)

**Olena Mitryasova**, Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, Professor of the Ecology Department  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9107-4448> **e-mail:** eco-terra@ukr.net

**Andrii Mats**, PhD student  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1226-5343> **e-mail:** andrejmac3@gmail.com

**Vadym Chvir**, Teacher of the Ecology Department  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-6098> **e-mail:** vip.chvir@gmail.com

**Viktor Smyrnov**, PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Ecology  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3136-4408> **e-mail:** vnsmirnov79@gmail.com

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

## COMPARATIVE ANALYSIS OF ATMOSPHERIC AIR AND SURFACE WATER QUALITY STANDARDS IN UKRAINE AND EU

**Abstract.** *The comparative analysis of environmental quality standards covers the assessment and comparison of standards and requirements established for environmental protection in Ukraine and EU countries. It covers various environmental objects such as air and water.*

*The purpose of the study was to determine the key indicators of environmental quality and compare the standards of atmospheric air and water quality that operate in the EU countries and Ukraine.*

*Research materials and methods. Atmospheric air and water quality standards, which are in force in the EU countries and Ukraine, were chosen as the subject of the study. The research materials are normative legal documents of Ukraine and the EU. The research methods were comparative analysis of maximum permissible concentrations of chemical substances, system analysis and the method of analogies.*

*Research results. It was determined that for determining the quality of atmospheric air, the indicators of maximum permissible concentrations of pollutants are, in most cases, stricter, however, for example, for ozone, the quality standard in the EU is stricter for EU countries. At the same time, the main air quality index in EU countries is an integrated indicator - air quality index.*

*For aquatic ecosystems, a comparative analysis of surface water quality standards introduced in Ukraine, EU countries and the USA (using the example of the state of Ohio) for many quality components, the EU and USA standards are stricter, especially for indicators such as: BOD, COD, chlorides, sulfates, phosphates, nitrates, nitrites, ammonium, chromium, mercury, petroleum products. However, according to indicators such as mineralization and copper, quality standards in Ukraine are stricter. There are almost identical requirements for such integrated quality indicators as pH and hardness.*

**Keywords:** *atmospheric air, surface waters, quality standards, air quality index, quality parameters of environmental objects.*

О.П. Мігрясова, А.Д. Мац, В.А. Чвир, В.М. Смирнов

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НОРМАТИВІВ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ І ПОВЕРХНЕВИХ ВОД В УКРАЇНІ ТА ЄС

***Анотація.** Подано порівняльний аналіз нормативів якості довкілля, що охоплює оцінку та порівняння стандартів і вимог, які встановлені для захисту навколишнього середовища в Україні та країнах ЄС. Він охоплює різні об'єкти довкілля, такі як повітря і вода.*

*Мета дослідження полягала у визначенні ключових показників якості довкілля та порівнянні стандартів якості атмосферного повітря і вод, які діють в країнах ЄС та Україні.*

*Матеріали та методи дослідження. Предметом дослідження було обрано нормативи якості атмосферного повітря і вод, які діють в країнах ЄС та Україні. Матеріалами дослідження є нормативно-правові законодавчі документи України та ЄС. Методами дослідження були порівняльний аналіз гранично допустимих концентрацій хімічних речовин, системний аналіз та метод аналогій.*

*Результати дослідження. З'ясовано, що для визначення якості атмосферного повітря показники гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин в Україні, у більшості випадків, є більш жорсткими, проте, наприклад, для озону норматив якості у ЄС є суворішим. Разом з тим, основним індексом якості атмосферного повітря в країнах ЄС є інтегрований показник – індекс якості атмосферного повітря.*

*Порівняльний аналіз нормативів якості поверхневих вод, які запроваджено в Україні, країнах ЄС, а також США (на прикладі штату Огайо), дозволив визначити, що за багатьма компонентами якості нормативи ЄС та США є більш жорсткими, особливо за такими показниками, як: ХСК, БСК, хлориди, сульфати, фосфати, нітрати, нітрити, амоній, хром, меркурій, нафтопродукти. Проте, за такими показниками, як мінералізація і купрум, нормативи якості в Україні є суворішими. До таких інтегрованих показників якості, як рН, жорсткість, існують майже однакові вимоги.*

***Ключові слова:** атмосферне повітря, поверхневі води, нормативи якості, індекс якості повітря, параметри якості об'єктів довкілля.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.28-44>

### Вступ

Українське екологічне право знаходиться на етапі реформувань та імплементації до нормативів якості та стандартів, прийнятих на теренах Європейського Союзу. Це стосується усіх сфер та об'єктів екологічної безпеки та раціонального природокористування [7–9]. Актуальним було і залишається питання щодо порівняльного аналізу нормативів якості довкілля, що охоплює оцінку та порівняння стандартів і вимог, які встановлені для захисту навколишнього середовища в Україні та країнах ЄС [6; 12; 16; 24]. Він охоплює різні об'єкти довкілля, зокрема, такі як атмосферне повітря і поверхневі води тощо.

**Мета дослідження** полягала у визначенні ключових показників якості довкілля та порівнянні стандартів якості атмосферного повітря, поверхневих вод, ґрунтів, які діють в країнах ЄС та Україні.

**Матеріали та методи дослідження.** Предметом дослідження було обрано нормативи якості атмосферного повітря, поверхневих вод, які діють в країнах ЄС та Україні. Матеріалами дослідження є нормативно-правові законодавчі документи України та ЄС. Методами дослідження були порівняльний аналіз нормативів якості об'єктів довкілля, системний аналіз та метод аналогій.

## **Результати дослідження**

На одному з етапів дослідження було вивчено системи моніторингу атмосферного повітря в Україні та урядову систему моніторингу в ЄС.

Моніторинг атмосферного повітря – це система збору, аналізу та вимірювання різних параметрів та складових атмосферного повітря для оцінки якості повітря та виявлення рівнів забруднюючих речовин. Мета такого моніторингу полягає у забезпеченні громадського здоров'я та охорони довкілля, а також визначення впливу антропогенних та природних чинників на якість повітря [5; 17].

В Україні паралельно діють державна та громадська системи моніторингу. Державна – це система Українського гідрометеорологічного центру, яка відбирає проби атмосферного повітря на 162 стаціонарних постах з періодичністю 3-4 рази на добу шість днів на тиждень. Інформація, зібрана цими станціями, дозволяє відстежувати якість повітря та при необхідності вживати заходів для зменшення забруднення. Результати моніторингу можуть бути опубліковані онлайн або доступні через інші канали для громадськості та зацікавлених сторін [10; 17].

Основними структурними елементами міжнародного моніторингу якості атмосферного повітря є наявність: розгалуженої системи моніторингових станцій; методології вимірювання основних показників якості повітря разом з моніторингом метеорологічного стану; системи збору, аналізу та передачі даних про стан якості атмосферного повітря; стратегії підтримки та розвитку системи моніторингу; комунікаційних інструментів щодо стану якості атмосферного повітря.

У Європейському Союзі (ЄС) основним є індекс якості повітря, який розкриває потенціал адаптації висвітленого світового досвіду до унікальних викликів, які постають перед нашою країною. Цей процес непростий, як виявлення відмінностей у природному та культурному контекстах, так і врахування всіх перешкод, які можуть ускладнити перенесення цінних навичок та підходів [11; 21].

Урядові інституції використовують Індекс якості повітря як дослідницький та комунікаційний. Зокрема, британський щоденний індекс якості повітря (Daily Air Quality Index), яким послуговуються урядові інституції Великобританії, має 10-значну шкалу, поділену на 4 частини, в якій (1) приймається як найнижче значення з найменшою небезпекою для здоров'я, а (10) – як найвище і найбільш загрозливе для здоров'я [21].

Індекс використовує понад 2000 станцій контролю якості повітря по всій Європі. Всі вони належать до мережі моніторингу атмосфери «Коперник» [21; 23].

Індекс оцінює якість повітря за чотирма показниками: тверді частинки пилу (PM<sub>2.5</sub> та PM<sub>10</sub>), наземний озон (O<sub>3</sub>), нітроген(IV) оксид (NO<sub>2</sub>) та сульфур(IV) оксид (SO<sub>2</sub>). Кожний з вказаних показників оцінюється відповідно до

стандартів, затверджених Директивами Європейського Союзу. Індекс якості повітря, який регулярно оновлює свої дані кожні 6 годин, має унікальну властивість – відображати інформацію в будь-якому хронологічному проміжку між 0 та 48 годинами. Несподівані труднощі виникають у випадках, коли дані від аналізаторів не надходять своєчасно. З метою вирішення обох викликів, Європейська агенція довкілля ефективно використовує метод наближення, щоб створювати модельні розрахунки для сценаріїв, де дані недоступні чи несвоєчасно отримані. Цей підхід не лише забезпечує постійність в інформаційному потоці, але й дозволяє врахувати можливі затримки та уточнювати прогнози якості повітря з високою точністю [23].

В Україні програма обов'язкового моніторингу якості атмосферного повітря включає сім забруднюючих речовин: пил, нітроген(IV) оксид (NO<sub>2</sub>), сульфур(IV) оксид (SO<sub>2</sub>), карбон(II) оксид, формальдегід (CH<sub>2</sub>O), свинець та бензопірен [10].

Порівняльний аналіз граничних показників забруднюючих речовин у ЄС та Україні подано у табл. 1.

Таблиця 1. Нормативні показники основних компонентів якості атмосферного повітря в Україні та країнах ЄС

Забруднювач	ЄС				Україна	
	Середнє значення протягом 1 години, мг/м <sup>3</sup>	Середнє значення протягом 8 годин, мг/м <sup>3</sup>	Середнє значення протягом 24 годин, мг/м <sup>3</sup>	Середнє значення протягом року, мг/м <sup>3</sup>	Гранично допустима концентрація середньодобова (ГДК <sub>сд</sub> ), мг/м <sup>3</sup>	Гранично допустима концентрація максимального разова (ГДК <sub>мр</sub> ), мг/м <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	-	-	0,05	0,04	не виокремлюються із загальної маси пилу (методики відсутні)	
PM <sub>2,5</sub>	-	-	0,025	-		
SO <sub>2</sub>	0,35	-	0,125	-	0,05	0,5
NO <sub>2</sub>	0,2	-	-	0,04	0,04	0,2
O <sub>3</sub>	-	0,12	-	-	0,03	0,16
CO	-	0,01	-	-	3	5
Свинець	-	-	-	0,0005	0,0003	0,001

В Європейському Союзі моніторинг за якістю атмосферного повітря регламентується такими директивами:

- Директива 1999/32/ЄС про сірку у рідкому паливі.
- Директива 98/70/ЄС щодо якості бензину та дизельного палива.
- Директива 94/63/ЄС стосовно контролю летючих органічних сполук (ЛОС).
- Директива 2004/42/ЄС про фарби.
- Директива 2004/107/ЄС щодо As, Cd, Hg, Ni та поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ) в атмосферному повітрі.



Основною директивою, якій слід приділити увагу, є Директива 2008/50/ЄС, що забезпечує рамкові вимоги щодо контролю та оцінки якості атмосферного повітря.

В Україні правові, організаційні та екологічні вимоги в галузі охорони і використання атмосферного повітря визначені Законом України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992 року № 2707-ХІІ, прийнятим у новій редакції 27.07.2022. Закон визначає загальні положення, а також регулює питання стандартизації і нормування в галузі охорони атмосферного повітря, організаційно-правових заходів щодо охорони атмосферного повітря, дотримання правових вимог при проектуванні, будівництві та реконструкції промислових об'єктів [2].

У законодавстві України закріплені нормативи якості атмосферного повітря. Вони представлені нормативами гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі (ГДК), орієнтовно безпечними рівнями впливу (ОБРВ) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць, затвердженими наказом МОЗ від 21 листопада 1997 р. № 336 та ін.

Нормативи ГДК забруднюючих речовин в атмосферному повітрі визначено у Державних санітарних правилах охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами), затверджених наказом МОЗ від 09 липня 1997 р. № 201 [11].

Узагальнюючи вищезазначене, можна прослідкувати те, що нормативні документи України щодо охорони атмосферного повітря частково відповідають нормативним документам ЄС, проте потребують узгодження. Найбільш скоординованою частиною нормативної бази щодо атмосферного повітря між Україною та ЄС є методи контролю, а відрізняються нормативні акти, що пов'язані з моніторингом стану довкілля, а саме розміщення постів спостережень та підходи нормування складу атмосферного повітря (ГДК).

Механізми щодо нормування вмісту забруднюючих речовин досить відрізняються. В українському законодавстві передбачено використання ГДК, яке базується на впливі забруднюючих речовин на здоров'я людини, у свою чергу законодавство ЄС також враховує аспект впливу забруднення на довкілля.

Імплементация вимог директив в Україні досі перебуває на етапі розроблення та схвалення необхідного законодавства, а не впровадження її стандартів на практиці. Триває робота над доопрацюванням концепції реформування державної системи моніторингу довкілля, порядку здійснення моніторингу атмосферного повітря загалом та зокрема за вмістом окремих забруднювачів повітря, встановлення зон та агломерацій за рівнем забруднення повітря тощо [15].

Серед перспектив імплементации законодавства ЄС виділяємо такі:

- Забезпечення кращої якості атмосферного повітря, що, в свою чергу, дозволить уникнути, попередити чи зменшити шкідливий вплив на здоров'я людини і довкілля;
- Зменшення захворюваності та кількості смертей, спричинених забрудненням повітря;
- Встановлення стандартів якості атмосферного повітря, безпечного для життя та здоров'я людини і довкілля;

- Запровадження системи управління якістю атмосферного повітря, здійснення оцінки та контролю задля підтримки належної якості чи покращення якості повітря;
- Запровадження моніторингу та збору інформації про стан атмосферного повітря;
- Створення мережі станцій автоматичного контролю якості атмосферного повітря;
- Інформування органами державної влади про стан атмосферного повітря;
- Гарантування доступу громадськості до інформації про стан атмосферного повітря;
- Маркування товарів щодо вмісту забруднюючих речовин, зокрема вмісту летких органічних сполук;
- Розробка та впровадження місцевих, регіональних чи національних планів поліпшення якості атмосферного повітря.

Отже, імплементація законодавства ЄС у сфері охорони атмосферного повітря може принести численні переваги для України. Це включає зменшення забруднення повітря, сприяння сталому розвитку, підвищення конкурентоспроможності українських компаній, міжнародну співпрацю та залучення інвестицій.

Однак, при цьому, необхідно враховувати можливі виклики та витрати, пов'язані з адаптацією до нових стандартів, таких як технічна модернізація, витрати на моніторинг та контроль, необхідність навчання фахівців, адміністративні та юридичні зміни, а також можливі економічні та соціальні виклики. Забезпечення балансу між екологічними цілями та реальними можливостями країни є ключовим для досягнення позитивних результатів в галузі охорони повітряного середовища.

Наступною частиною дослідження було вивчення та аналіз нормативів якості поверхневих вод в Україні та зарубіжних країнах. Основним документом, який регламентує якість поверхневих вод в Європейському Союзі, є Рамкова директива про води (Water Framework Directive або WFD). Ця директива була прийнята в 2000 році і встановлює загальний підхід до охорони та управління водними ресурсами в ЄС. Водна Рамкова Директива (повна назва Директива 2000/60/ЄС Європейського парламенту і Ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики) визначає загальні принципи охорони водних ресурсів у ЄС, включаючи господарсько-побутові води. До того, нормативи до якості поверхневих вод також регулюються Директивою Ради 91/271/ЄС від 21 травня 1991 року про очищення стічних вод, а також Директивою Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною.

Водною Рамковою Директивою (ВРД) ЄС запроваджено принципово новий підхід до системи управління водними ресурсами – інтегроване управління водними ресурсами за басейновим принципом [3].

Кожна країна, яка підписала зобов'язання щодо реалізації ВРД, має виділити на своїй території райони річкових басейнів, які містять один або декілька річкових басейнів разом з пов'язаними з ними підземними та прибережними водами. Для кожного району річкового басейну розробляють план управління, який містить аналіз характеристик району річкового басейну і стану води та програми заходів для досягнення цілей ВРД.

Мета, поставлена Директивою, є досить амбітною: за 15 років (до кінця 2015 р.) усі країни – члени ЄС мали забезпечити досягнення усіма поверхневими та підземними водними об'єктами доброго екологічного та хімічного статусу.

У 2014 р. Україна підписала Угоду про асоціацію з Європейським Союзом та його державами-членами. Підписання цього документу зобов'язує нашу країну застосовувати європейські стандарти у різних сферах суспільного життя, зокрема, у сфері управління водними ресурсами, їхньої охорони та запровадження заходів з очищення забруднених вод.

В Україні план імплементації ВРД ЄС затверджено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15 квітня 2015 р. № 371 «Про схвалення розроблених Міністерством екології та природних ресурсів планів імплементації деяких актів законодавства ЄС» [25].

Стан поверхневих вод визначають за екологічним та хімічним статусом. Стан підземних вод визначають за хімічним статусом та запасами. В Україні виділено 9 районів річкових басейнів. Нинішня система моніторингу в Україні налічує близько 400 пунктів спостережень за 16 показниками.

Нині відбувається зміщення акцентів від оцінки якості середовища як ресурсу в бік оцінювання стану середовища як місця мешкання людини та біоти. Відбувається перехід від хімічного контролю якості води як ресурсу на оцінювання екологічного стану гідроекосистем, що означає заміну критеріального підходу, спрямованого на деякі норми якості води (ГДК, ГДС та ін.), інтегрованим підходом [7; 8].

Стан поверхневих вод визначають за екологічним та хімічним статусом. Екологічний статус визначають, насамперед, за станом біологічних елементів (риба, донні безхребетні, водна флора та ін.) і оцінюють за п'ятьма класами: відмінний; добрий; задовільний; поганий; дуже поганий.

Хімічний статус визначають за пріоритетними забруднювачами. До них належать важкі метали (Кадмій, Плюмбум, Нікол, Меркурій) та органічні речовини, які є токсичними для живих організмів. Разом до переліку пріоритетних речовин віднесено 45 речовин: 33 – Директивою 2008/105/ЄС про екологічні стандарти у сфері водної політики та 12 – Директивою 2013/39/ЄС, яка вносить зміни до ВРД та Директиви 2008/105/ЄС [18; 19; 20].

Хімічний статус оцінюють лише за двома класами: добрий; неспроможний досягнути доброго. Стан підземних вод визначають за хімічним статусом та запасами.

В основі класифікації екологічного статусу поверхневих вод покладено референційні умови, які мають бути визначені для кожного типу поверхневих вод. Референційні умови – це умови, що відображають стан навколишнього природного середовища за відсутності або мінімального антропогенного впливу. Задля визначення референційних умов проводиться ретроспективний аналіз гідроекосистеми та за можливості палереконструкція останньої, після того здійснюють моделювання природних закономірностей змін гідробіологічних параметрів [7].

Біологічні оцінки виражаються як екологічні коефіцієнти якості (EQR) – визначені як наявний стан/очікуваний стан [3].

При проведенні моніторингу визначаються, насамперед, біологічні елементи якості, а також гідроморфологічні, фізико-хімічні і специфічні умови при відмінному екологічному стані.

Для штучно змінених поверхневих вод визначається максимальний екологічний потенціал (МЕП).

Моніторинг вод – це система спостережень, збирання, обробки, збереження і аналізу інформації про стан водних об'єктів, прогнозування його змін та розробки науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття відповідних рішень. До видів державного моніторингу поверхневих та підземних вод належать: діагностичний; операційний; дослідницький [7].

Діагностичному моніторингу підлягають усі масиви поверхневих та підземних вод (рис. 1). Він здійснюється для доповнення та підтвердження антропогенного впливу на стан поверхневих та підземних вод; розроблення програми державного моніторингу; визначення референційних умов та оцінювання їх довгострокових змін, а також здійснення моделювання стану вод у результаті природних змін та антропогенного впливу.

Для шестирічної системи моніторингу, діагностичний моніторинг для поверхневих вод здійснюється 1-й та 4-й рік, а для підземних вод – 1-й і 2-й рік.

Операційному моніторингу підлягають усі масиви поверхневих та підземних вод, де спостерігається не досягнення доброго екологічного статусу, а також такі масиви вод, де забір води упродовж року становить більше ніж 100 м<sup>3</sup>/добу [22].

Операційний моніторинг здійснюють для визначення екологічного та хімічного станів вод; оцінювання змін у стані вод під час проведення заходів, передбачених планом управління річковим басейном; визначення довгострокових тенденцій зміни концентрацій забруднюючих речовин під впливом антропогенної діяльності.

Операційний моніторинг для поверхневих вод здійснюється на 2-й, 3-й, 5-й і 6-й рік, а для підземних вод – на 3-й, 4-й, 5-й і 6-й рік шестирічної програми управління.

Дослідницький моніторинг здійснюється для усіх масивів вод, без конкретних термінів за потреби. Основні завдання дослідницького моніторингу полягають у визначенні причин погіршення стану водних об'єктів, з'ясуванні масштабів та наслідків антропогенного забруднення вод, розрахунку екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням вод. Принципову схему оперативного і дослідницького моніторингу подано на рис. 1 [7; 20].

Перший етап реалізації Директиви в Україні полягає у прийнятті національного законодавства та визначенні уповноваженого органу; закріпленні на законодавчому рівні та визначенні одиниці гідрографічного районування території країни та розробленні положення про басейнове управління з покладанням на нього відповідних функцій. Наступний етап – у визначенні районів річкових басейнів та створенні механізмів управління міжнародними річками, озерами та прибережними водами; аналізі характеристик районів річкових басейнів та запровадженні програм моніторингу якості води. Далі відбуватиметься підготовка планів управління басейнами річок, проведення консультацій з громадськістю та публікація цих планів.

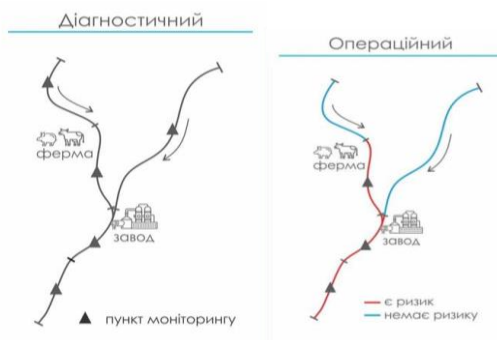


Рис. 1. Пункти спостережень під час діагностичного та операційного моніторингу поверхневих вод [7]

Починаючи з 2019 року, у нашій країні був започаткований новий порядок здійснення системи моніторингу поверхневих, підземних та морських вод. Цей порядок відповідає директивам ЄС, що передбачає чітку, узгоджену процедуру і, разом з тим, прибирає функції дублювання між різними установами, суб'єктами моніторингу. Завдяки новому порядку моніторингу буде отримано дані, необхідні для розробки та затвердження Планів управління річковими басейнами та Морської Стратегії. Отже, вже існуюча система моніторингу передбачає чіткий розподіл обов'язків між організаціями, які визначають показники, без дублювання повноважень, розширений список біологічних, гідроморфологічних, хімічних і фізико-хімічних показників для моніторингу, запровадження шестирічного циклу моніторингу, введення класифікації стану вод: 5 класів екологічного стану і 2 класи хімічного стану, збільшення кількості пунктів моніторингу вод з сотень до декількох тисяч. Означені заходи дозволять імплементувати українське екологічне право до стандартів ЄС.

Система моніторингу у країнах ЄС відрізняється системністю, систематичністю, широкою розгалуженістю пунктів спостережень, інформативністю та оперативністю.

В Україні, згідно зі Статтею 35 Водного кодексу, виокремлюють такі види поверхневих вод: для господарсько-побутових потреб, а також рибогосподарського призначення [1].

Нормативи якості водних об'єктів встановлені відповідно до окремих категорій водокористування, а саме: категорії водокористування водних об'єктів або їх частин у якості джерела для централізованого або нецентралізованого питного водопостачання, а також для водопостачання підприємств харчової промисловості; категорії водокористування водних об'єктів або їх частин для господарсько-побутового, водокористування в оздоровчих, рекреаційних, спортивних цілях, а також для водних об'єктів в межах населених пунктів.

Господарсько-побутові води – це води, які виникають в результаті побутової і господарської діяльності людей, що може охоплювати води, які використовуються в побуті (наприклад, для пиття, приготування їжі, прийому душу, прання тощо), а також води, що виникають в результаті діяльності різних господарських підприємств та установ [1].

Визначення норм для господарсько-побутових вод регулюється різними законами та нормативними документами в кожній країні. Для України – це: Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища", який регулює аспекти охорони водних ресурсів та встановлює вимоги до якості води, включаючи господарсько-побутові води; Санітарні норми та правила "Водопостачання і водовідведення" (СНіП 2.04.02-84), що містять вимоги до якості питної води та стічних вод; Водний кодекс України [14]; Наказ МОЗ «Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» [13] тощо. У табл. 2 узагальнено основні документи, які є базою для нормування та оцінювання якості вод в Україні та країнах ЄС, а також США.

Світова практика встановлення нормативів якості води ґрунтується на досвіді провідних країн світу, зокрема США, де діє закон про чисту воду (Clean Water Act – CWA). Цей закон встановлює базову структуру для регулювання викидів забруднюючих речовин у води Сполучених Штатах і регулювання стандартів якості поверхневих вод. Основа CWA була прийнята в 1948 році і називалася Федеральний закон про контроль забруднення води, але Закон був значно реорганізований і розширений в 1972 році. «Закон про чисту воду» став загальною назвою Закону з поправками в 1972 році [20]. Також у США діє Національний стандарт з ефлуентів для господарсько-побутових очисних споруд (National Effluent Limitation Guidelines for Municipal Wastewater Treatment Plants), який встановлює конкретні обмеження для різних параметрів в господарсько-побутових стічних водах [22].

Закон про чисту воду в США (Clean Water Act) регулює викиди забруднюючих речовин у водні тіла та встановлює норми для забезпечення якості води. Основні положення цього закону визначаються в Статті 402 та Статті 303.

Основні аспекти Clean Water Act:

– кожний штат має встановлювати власні норми якості води для своїх водойм, які визначають припустимий рівень забруднення різними речовинами. Ці норми мають бути розроблені з урахуванням різних цілей щодо використання води, таких як питні, риболовні, купання тощо;

– закон вимагає від штатів розробляти та виконувати програми моніторингу для визначення рівнів забруднення та ефективності заходів з їхнього зменшення;

– згідно з розділом 402, дозволи на викиди визначають умови, яких обов'язково слід дотримуватися для підприємств та інших джерел забруднення перед тим, як вони можуть викидати забруднюючі речовини у водні тіла;

– закон дозволяє регулювати викиди особливо небезпечних речовин та визначає обов'язки для їхнього контролю та управління;

– закон встановлює механізм обміну інформацією між федеральним, штатним та місцевим рівнями для забезпечення відповідного моніторингу та виконання вимог [20].

Ці норми та положення допомагають забезпечити воду в США належної якості та захистити водні ресурси від забруднення.

Таблиця 2. Основні документи, які визначають норми до якості водних ресурсів, включаючи господарсько-побутові води

Україна	ЄС	США
Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища».	Директива 2008/105/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 16 грудня 2008 року про стандарти якості навколишнього середовища у сфері водної політики [18].	Закон про чисту воду (Clean Water Act) [20].
Водний кодекс України [1].	Директива 2000/60/ЄС Європейського парламенту і Ради від 23 жовтня 2000 року про встановлення рамок діяльності Співтовариства у сфері водної політики [3].	Національний стандарт з ефлюентів для господарсько-побутових очисних споруд (National Effluent Limitation Guidelines for Municipal Wastewater Treatment Plants) [22].
Наказ МОЗ «Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення» від 2 травня 2022 р. № 721 [13].	Директива Ради 98/83/ЄС від 3 листопада 1998 року про якість води, призначеної для споживання людиною.	Програма дозволів на викиди (National Pollutant Discharge Elimination System – NPDES). Розділ 402 Закону про чисту воду встановлює систему дозволів для організацій і підприємств, які викидають забруднюючі речовини у водні об'єкти [30].
Санітарні норми та правила «Водопостачання і водовідведення» (СНіП 2.04.02-84) [14].	Директива Ради 91/271/ЄС від 21 травня 1991 року про очищення стічних вод [4].	Закон про контроль над токсичними речовинами – TSCA [28].
Наказ МОЗ «Про затвердження державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів» №173 від 19.06.1996 р. [14].	Директива Ради 75/440/ЄЕС від 16 червня 1975 року щодо якості, необхідної для поверхневої води, призначеної для забору питної води в державах-членах [19].	Закон про комплексне реагування навколишнього середовища, компенсацію та відповідальність – CERCL [30].

Порівняльну характеристику нормативів якості поверхневих вод для господарсько-побутових потреб в Україні та світі подано у табл. 3. Оскільки стандарти якості води для кожного штату можуть відрізнятися, у табл. 3 наведено показники для штату Огайо [26; 27; 29]. Штат Огайо США обрано на підставі того, що він належить до подібної географічно-кліматичної зони України.

Таблиця 3. Порівняльна характеристика нормативів якості поверхневих вод для господарсько-побутових потреб в Україні та світі

№/п	Показник	Україна	ЄС	США, штат Огайо
1.	Температура води, °С	-	-	-
2.	Колір, см	10	без значних аномалій	15
3.	рН	6,5–8,5	6,0–9,0	6,5–8,5
4.	Жорсткість, мг-екв/дм <sup>3</sup>	7	12	7
5.	Лужність		-	400
6.	Кальцій, мг/дм <sup>3</sup>	200	150	160
7.	Магній, мг/дм <sup>3</sup>	50	-	100
8.	Мінералізація, мг/дм <sup>3</sup>	1000	1500	1500
9.	Хлориди, мг/дм <sup>3</sup>	350	200	250
10.	Сульфати, мг/дм <sup>3</sup>	500	150	250
11.	Сульфіди, мг/дм <sup>3</sup>	0		-
12.	Нітрати, мг/дм <sup>3</sup>	45	50	0,01
13.	Нітриди, мг/дм <sup>3</sup>	3,3	-	0,001
14.	Фосфати, мг/дм <sup>3</sup>	3,5	0,2	0,05
15.	Ціаніди, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	0,05	0,025
16.	Зважені речовини, мг/дм <sup>3</sup>	0,75 + фон (30)	-	-
17.	Розчинний кисень, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	≥ 4	-	≥ 6
18.	БСК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	≤ 6 (при 20°С)	-	≤ 3 (при 20°С)
19.	ХСК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	30	-	16
20.	Амоній-йони, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	0,1	0,25
21.	Ферум загальний, мг/дм <sup>3</sup>	0,3	0,1	0,3
22.	Нафтопродукти, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	-	0,01
23.	СПАР, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	0,3	-
24.	Хром(+3), мг/дм <sup>3</sup>	0,5	0,02	0,001
25.	Хром(+6), мг/дм <sup>3</sup>	0,05		
26.	Цинк, мг/дм <sup>3</sup>	1,00	0,50	5,00
27.	Купрум, мг/дм <sup>3</sup>	1,00	0,02	1,30
28.	Алюміній, мг/дм <sup>3</sup>	0,5	0,2	0,2
29.	Феноли, мг/дм <sup>3</sup>	0,001	0,001	0,004
30.	Кадмій, мг/дм <sup>3</sup>	0,001	0,001	0,005
31.	Нікол, мг/дм <sup>3</sup>	0,1	-	0,610
32.	Меркурій, мг/дм <sup>3</sup>	0,0005	0,0005	0,000012
33.	Коліформи, кількість/дм <sup>3</sup>	≤ 100	50/100 см <sup>3</sup>	130/100 см <sup>3</sup>

Примітка:

- норматив не визначено.

### Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведено порівняльний аналіз законодавчої бази ЄС і України, яка регламентує показники якості об'єктів довкілля. Висвітлені питання щодо процедури здійснення моніторингу якості об'єктів довкілля. З'ясовано, що для визначення якості атмосферного повітря показники гранично допустимих



концентрацій забруднюючих речовин в Україні, у більшості випадків, є більш жорсткими, проте, наприклад, для озону норматив якості у ЄС є суворішим. Основним індексом якості атмосферного повітря в країнах ЄС є інтегрований показник – індекс якості атмосферного повітря.

Порівняльний аналіз нормативів якості поверхневих вод, які запроваджено в Україні, країнах ЄС, а також США (на прикладі штату Огайо) дозволяє зробити такі висновки. За багатьма компонентами якості, нормативи ЄС та США є більш жорсткими, особливо за такими показниками, як: ХСК, БСК, хлориди, сульфати, фосфати, нітрати, нітрити, амоній, хром, меркурій, нафтопродукти. Проте, за такими показниками, як мінералізація і купрум, нормативи якості в Україні є суворішими. До таких інтегрованих показників якості, як рН, жорсткість, існують майже однакові вимоги.

Поза межами даного дослідження залишилось вивчення українського та зарубіжного досвіду нормативів якості, стандартів щодо екологічної оцінки ґрунтів. У перспективі окремого ґрунтового порівняльного аналізу потребує вивчення світового досвіду з оцінювання якості та стандартів до питної води, яку отримано з різних джерел, а саме, поверхневих, підземних вод. Залишається відкритим питання оцінювання якості води для питних потреб селищ, міст, які залишились без системи сталого водоспоживання за умов воєнного часу.

## Подяка

Дякуємо Програмі Європейського Союзу Еразмус+ за підтримку дослідницької роботи в рамках проекту Еразмус+ Жана Моне на базі кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили (“Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them”).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Водний Кодекс України. Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995, № 24, 189 с. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення 10.12.2023).
2. Державна екологічна інспекція України. Державна екологічна інспекція України. URL : <https://dei.gov.ua/post/2321> (дата звернення: 20.11.2023).
3. Директива Європейського Парламенту і Ради 2000/60/ЄС від 23 жовтня 2000 року «Про встановлення рамок заходів Співтовариства в галузі водної політики». URL : [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text) (дата звернення 5.12.2023).
4. Директива Ради 91/271/ЄЕС від 21 травня 1991 року про очищення міських стічних вод. URL : [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_911#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_911#Text) (дата звернення 5.12.2023).
5. Екологічний моніторинг довкілля – Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України – офіційний сайт. URL : <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnuy-monitoring/ekologichnuy-monitoring-dovkillya/> (дата звернення: 20.11.2023).
6. Крайнюкова, А. М. (2017). Особливості нормування якості поверхневих вод в Україні та країнах ЄС. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Екологія". Випуск 16. С. 18–21.

7. Мітрясова, О., Смирнов, В., Безсонов, Є. (2020). Екологічний інтегрований менеджмент водних ресурсів у європейських країнах: навчальний посібник / за ред. проф. Олени Мітрясової. Миколаїв: ЧНУ імені Петра Могили, 288 с.
8. Мітрясова, О.П., Смирнов, В.М., Марійчук, Р.Т., Чвир, В.А. (2024). Європейські зелені виміри: навч. посібник / за редакцією проф. Олени Мітрясової. Миколаїв: ЧНУ імені Петра Могили, 471 с. URL : [https://eugreendimensions.chmnu.edu.ua/storage/resources/EUROPEAN%20GREEN%20DIMENSIONS\\_text%20book\\_compressed.pdf](https://eugreendimensions.chmnu.edu.ua/storage/resources/EUROPEAN%20GREEN%20DIMENSIONS_text%20book_compressed.pdf) (дата звернення 1.02.2024).
9. Основні засади (стратегія) державної екологічної політики України на період до 2030 року (затв. Законом України від 28 лютого 2019 року № 2697-VIII). URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>. (дата звернення 20.11.2023).
10. Повітря під час війни. Чому важливо моніторити забруднення та розповідати про це | Heinrich Böll Stiftung | Київ – Україна. URL : <https://ua.boell.org/uk/2022/11/16/povitrya-pid-chas-viyny-chomu-vazhlyvo-monitoryty-zabrudnennya-ta-rozpovidaty-pro-tse> (дата звернення: 20.11.2023).
11. Порівняльний аналіз законодавства ЄС та України в галузі охорони атмосферного повітря. URL : <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/2/35.pdf> (дата звернення: 20.11.2023).
12. Про схвалення розроблених Міністерством екології та природних ресурсів планів імплементації деяких актів законодавства ЄС : розпорядження Кабінету Міністрів України від 15 квітня 2015 р. № 371. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-%D1%80#Text> (дата звернення 5.12.2023).
13. Про затвердження Гігієнічних нормативів якості води водних об'єктів для задоволення питних, господарсько-побутових та інших потреб населення : Наказ МОЗ від 2 травня 2022 р. № 721. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (дата звернення 2.12.2023).
14. Про затвердження державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів : Наказ МОЗ від 19 червня 1996 р. №173. URL : [https://zakononline.com.ua/documents/show/170205\\_\\_522407](https://zakononline.com.ua/documents/show/170205__522407) (дата звернення 6.12.2023).
15. Ресурсно-аналітичний центр «Суспільство і довкілля». URL : <https://www.rac.org.ua/uploads/content/544/files/web04air210x210ua2019.pdf> (дата звернення: 20.11.2023).
16. Фундація «Відкрите суспільство». URL : [https://osf.org.ua/data/blog\\_dwnl/Analitichna\\_zapiska\\_atmosferne\\_povitrya.pdf](https://osf.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_povitrya.pdf) (дата звернення: 20.11.2023).
17. Air. Environment. URL : <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (date of access: 20.11.2023).
18. Directive 2008/105/EEC of the European Parliament and of the Council on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0105> (date of access 5.12.2023).
19. Directive 75/440/EEC of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the Member States. URL : <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31975L0440> (date of access 6.12.2023).
20. Clean Water Act (CWA). URL : [https://www.law.cornell.edu/wex/clean\\_water\\_act\\_cwa](https://www.law.cornell.edu/wex/clean_water_act_cwa) (date of access 8.12.2023).
21. European Air Quality Index. URL : <https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/> (дата звернення: 20.11.2023).
22. Effluent Guidelines. URL : <https://www.epa.gov/eg> (date of access 8.12.2023).
23. Home | Copernicus. Home | Copernicus. URL : <http://atmosphere.copernicus.eu/> (date of access: 20.11.2023).
24. Mitryasova, O., Bezsonov, Ye., Smyrnov, V., Mats, A. (2019). Comparative Analysis of Key Aspects of Environmental Policy in the Field of Water Resources Security in Developing Countries and the EU, *Environmental Problems*, 4 (3), 143–150.

25. Mitryasova, O. P., Pohrebennyk, V. D., Petrov, O. S., Bezsonov, Ye. M., Smyrnov, V. M. (2021). Environmental Water Security Policy in the EU, Ukraine and other Developing Countries, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 125–130. URL : <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/125> (date of access 2.12.2023).
26. Ohio River Valley Water Sanitation Commission : POLLUTION CONTROL STANDARDS for Discharges to the Ohio River 2019 Revision. URL : <https://www.orsanco.org/wp-content/uploads/2019/06/Final-Standards-Doc-2019-Revision.pdf> (date of access 8.12.2023).
27. Ohio Surface Water Quality Standards. 2020. 303 p. URL : [https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-11/AK-HHC-DEC-Correspondence-11-1-2022-Attachment\\_0.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-11/AK-HHC-DEC-Correspondence-11-1-2022-Attachment_0.pdf) (date of access 9.12.2023).
28. Toxic Substances Control Act (TSCA) and Federal Facilities. 1976. URL : <https://www.epa.gov/enforcement/toxic-substances-control-act-tsca-and-federal-facilities> (date of access 9.12.2023).
29. State of Ohio Water Quality Standards, OAC Chapter 3745-1. URL : [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/oh\\_34751\\_1\\_to\\_40.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/oh_34751_1_to_40.pdf) (date of access 9.12.2023).
30. Summary of the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (Superfund). 1980. URL : <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-comprehensive-environmental-response-compensation-and-liability-act> (date of access 9.12.2023).

*Стаття надійшла до редакції 03.03.2024 і прийнята до друку після рецензування 19.06.2024*

## REFERENCES

1. Water Code of Ukraine. (1995). Information of the Verkhovna Rada of Ukraine (IVRU), No. 24, 189 p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (accessed December 10, 2023).
2. State Environmental Inspection of Ukraine. (n.d.). State Environmental Inspection of Ukraine. URL: <https://dei.gov.ua/post/2321> (accessed November 20, 2023).
3. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_962#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_962#Text) (accessed December 5, 2023).
4. Council Directive 91/271/EEC of 21 May 1991 concerning urban wastewater treatment. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994\\_911#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_911#Text) (accessed December 5, 2023).
5. Environmental Monitoring of the Environment – Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. (n.d.). Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine – official website. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/ekologichnyj-monitoryng-dovkillya/> (accessed November 20, 2023).
6. Krainyukova, A. M. (2017). Features of surface water quality standards in Ukraine and EU countries. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Ecology"*, 16, 18–21.
7. Mitryasova, O., Smyrnov, V., & Bezsonov, Ye. (2020). Ecological integrated water resources management in European countries: A textbook (O. Mitryasova, Ed.). Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea National University, 288 p.
8. Mitryasova, O. P., Smyrnov, V. M., Mariychuk, R. T., & Chvyr, V. A. (2024). European Green Dimensions: A textbook (O. Mitryasova, Ed.). Mykolaiv: Petro Mohyla Black Sea National University, 471 p. URL: [https://eugreendimensions.chmnu.edu.ua/storage/resources/EUROPEAN%20GREEN%20DIMENSIONS\\_text%20book\\_compressed.pdf](https://eugreendimensions.chmnu.edu.ua/storage/resources/EUROPEAN%20GREEN%20DIMENSIONS_text%20book_compressed.pdf) (accessed February 1, 2024).

9. Principles (Strategy) of the State Environmental Policy of Ukraine for the Period up to 2030 (approved by the Law of Ukraine of February 28, 2019, No. 2697-VIII). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text> (accessed November 20, 2023).
10. Heinrich Böll Stiftung (n.d.). Air during the war. Why it is important to monitor pollution and talk about it. Kyiv – Ukraine. URL: <https://ua.boell.org/uk/2022/11/16/povitrya-pid-chas-viyny-chomu-vazhlyvo-monitoryty-zabrudnennya-ta-rozpovidaty-pro-tse> (accessed November 20, 2023).
11. Comparative analysis of EU and Ukrainian legislation in the field of air protection. (n.d.). URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2018/2/35.pdf> (accessed November 20, 2023).
12. Approval of implementation plans for certain EU legislative acts developed by the Ministry of Ecology and Natural Resources: Cabinet of Ministers of Ukraine Order of April 15, 2015, No. 371. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/371-2015-%D1%80#Text> (accessed December 5, 2023).
13. Approval of hygienic standards for water quality of water bodies to meet drinking, household, and other needs of the population: Order of the Ministry of Health of May 2, 2022, No. 721. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (accessed December 2, 2023).
14. Approval of state sanitary rules for planning and development of settlements: Order of the Ministry of Health of June 19, 1996, No. 173. URL: [https://zakononline.com.ua/documents/show/170205\\_\\_522407](https://zakononline.com.ua/documents/show/170205__522407) (accessed December 6, 2023).
15. Resource and Analytical Center “Society and Environment.” (n.d.). URL: <https://www.rac.org.ua/uploads/content/544/files/web04air210x210ua2019.pdf> (accessed November 20, 2023).
16. Open Society Foundation. (n.d.). URL: [https://osf.org.ua/data/blog\\_dwnl/Analitichna\\_zapiska\\_atmosferne\\_povitrya.pdf](https://osf.org.ua/data/blog_dwnl/Analitichna_zapiska_atmosferne_povitrya.pdf) (accessed November 20, 2023).
17. Air. Environment. (n.d.). URL: <http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm> (accessed November 20, 2023).
18. Directive 2008/105/EEC of the European Parliament and of the Council on environmental quality standards in the field of water policy, amending and subsequently repealing Council Directives. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0105> (accessed December 5, 2023).
19. Directive 75/440/EEC of 16 June 1975 concerning the quality required of surface water intended for the abstraction of drinking water in the Member States. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX%3A31975L0440> (accessed December 6, 2023).
20. Clean Water Act (CWA). (n.d.). URL: [https://www.law.cornell.edu/wex/clean\\_water\\_act\\_cwa](https://www.law.cornell.edu/wex/clean_water_act_cwa) (accessed December 8, 2023).
21. European Air Quality Index. (n.d.). URL: <https://airindex.eea.europa.eu/Map/AQI/Viewer/> (accessed November 20, 2023).
22. Effluent Guidelines. (n.d.). URL: <https://www.epa.gov/eg> (accessed December 8, 2023).
23. Home | Copernicus. (n.d.). URL: <http://atmosphere.copernicus.eu/> (accessed November 20, 2023).
24. Mitryasova, O., Bezsonov, Ye., Smyrnov, V., & Mats, A. (2019). Comparative analysis of key aspects of environmental policy in the field of water resources security in developing countries and the EU. *Environmental Problems*, 4(3), 143–150.
25. Mitryasova, O. P., Pohrebennyk, V. D., Petrov, O. S., Bezsonov, Ye. M., & Smyrnov, V. M. (2021). Environmental water security policy in the EU, Ukraine, and other developing countries. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2, 125–130. URL: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/125> (accessed December 2, 2023).
26. Ohio River Valley Water Sanitation Commission. (2019). Pollution Control Standards for Discharges to the Ohio River: 2019 Revision. URL: <https://www.orsanco.org/wp-content/uploads/2019/06/Final-Standards-Doc-2019-Revision.pdf> (accessed December 8, 2023).

27. Ohio Surface Water Quality Standards. (2020). 303 p. URL: [https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-11/АК-ННС-DEC-Correspondence-11-1-2022-Attachment\\_0.pdf](https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-11/АК-ННС-DEC-Correspondence-11-1-2022-Attachment_0.pdf) (accessed December 9, 2023).
28. Toxic Substances Control Act (TSCA) and Federal Facilities. (1976). URL: <https://www.epa.gov/enforcement/toxic-substances-control-act-tsca-and-federal-facilities> (accessed December 9, 2023).
29. State of Ohio Water Quality Standards, OAC Chapter 3745-1. (n.d.). URL: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/oh\\_34751\\_1\\_to\\_40.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/oh_34751_1_to_40.pdf) (accessed December 9, 2023).
30. Summary of the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act (Superfund). (1980). URL: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-comprehensive-environmental-response-compensation-and-liability-act> (accessed December 9, 2023).

*The article was received 03.03.2024 and was accepted after revision 19.06.2024*

**Мігрясова Олена Петрівна**

доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри екології Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Адреса робоча:** 54003, Україна, м. Миколаїв, вул. 68 Десантників, 10

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9107-4448> **e-mail:** eco-terra@ukr.net

**Мац Андрій Дмитрович**

аспірант кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Адреса робоча:** вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1226-5343> **e-mail:** andrejmac3@gmail.com

**Чвир Вадим Андрійович**

викладач кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Адреса робоча:** вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3809-6098> **e-mail:** vip.chvir@gmail.com

**Смирнов Віктор Миколайович**

кандидат геологічних наук, доцент, доцент кафедри екології, Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Адреса робоча:** вул. 68 Десантників, 10, м. Миколаїв, 54003, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3136-4408> **e-mail:** vnsmirnov79@gmail.com

УДК 504.064.2

**Artem Goncharenko**, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5647-1360> **e-mail:** [hosting.pat@gmail.com](mailto:hosting.pat@gmail.com)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **DETERMINATION OF CLIMATE RISKS IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY AGAINST MILITARY ACTIONS**

**Abstract.** *The post-war reconstruction of Ukraine requires the introduction of low-carbon technologies in the construction sector and adaptation measures to climate change, taking into account greenhouse gas emissions caused by military actions in Ukraine. In this study, based on existing domestic and global regulatory documents on determining climate risks, chains of influence on climate risk are presented within the framework of assessing climatic factors that affect the calculated energy consumption data of a building at the project stage in the winter and summer periods. Preliminary calculations of the dynamics of changes in energy consumption for heating in the winter period for the city of Kyiv showed a decrease in energy consumption in two winter months by almost 16%, starting from 1942 for a conventional panel house with a wall area of 200 m<sup>2</sup>. While energy consumption for cooling in the hot period has been gradually increasing over the last decade. The forecast dynamics of the average monthly temperature according to the usual and wet bulb thermometer in July in 2050 is 26.371°C and 28.918°C, respectively. Modeling the dynamics of temperature increase for the city of Kyiv was carried out on the basis of climate databases: ECA&, Copernicus and the Central Geophysical Observatory named after B. Sreznevsky, as well as assessment reports on global climate change. The category of intermediate impacts included the impact of military actions on the urban environment and population, such as: an increase in the heat dome over the urbanized area, an increase in the heat index for public health, an increase in atmospheric air pollution. Possible adaptation measures should be taken depending on the specific reconstruction project throughout the life cycle of the facility, taking into account innovative low-carbon technologies, including the production of building materials. These studies may be promising in the future for finding ways to compensate for the mitigation of climate damage caused by Russia's military actions and neutralize this impact in modern buildings and structures.*

**Keywords:** *climate risk, greenhouse gas emissions, construction industry, military operations.*

**А.В. Гончаренко**

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

## **ВИЗНАЧЕННЯ КЛІМАТИЧНИХ РИЗИКІВ В БУДІВЕЛЬНІЙ ГАЛУЗІ НА ФОНІ ВОЄННИХ ДІЙ**

**Анотація.** *Післявоєнна відбудова України потребує впровадження низьковуглецевих технологій в будівельному секторі та адаптаційних заходів до змін клімату з врахуванням викидів парникових газів, що спричинено воєнними діями в Україні. В даному дослідженні на підставі існуючих вітчизняних та світових нормативних документів щодо визначення кліматичних ризиків представлено ланцюжки впливу на кліматичний ризик в рамках оцінювання кліматичних факторів, що впливають на розрахункові дані*

енергоспоживання будівлі на стадії проекту в зимовий та літній періоди. Попередні розрахунки динаміки змін споживання енергії на опалення в зимовий період для м. Києва засвідчили зниження споживання енергії за два зимові місяці майже на 16%, починаючи з 1942 року, для звичайного панельного будинку з площею стін 200 м<sup>2</sup>. Тоді як енерговитрати на охолодження в спекотний період протягом останнього десятиліття поступово зростають. Прогнозна динаміка середньомісячної температури за звичайним та за вологим термометром у липні в 2050 році становить відповідно – 26,371°C і 28,918°C. Моделювання динаміки підвищення температурних показників для м. Києва здійснювалося на підставі кліматичних баз даних: ECA&, Copernicus та Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського, а також оціночних звітів щодо глобальних кліматичних змін. В категорію проміжних впливів було включено вплив воєнних дій на міське середовище і населення, таких як: збільшення теплового куполу над урбанізованою територією, зростання теплового індексу для здоров'я населення, збільшення забруднення атмосферного повітря. Можливі адаптаційні заходи мають прийматися в залежності від конкретного проекту відбудови протягом життєвого циклу об'єкта з врахуванням інноваційних низьковуглецевих технологій, в тому числі виробництва будівельних матеріалів. Дані дослідження можуть бути перспективними в подальшому для пошуку шляхів компенсації щодо пом'якшення кліматичної шкоди, завданої воєнними діями Росії, та нейтралізації цього впливу у сучасних будівлях та спорудах.

**Ключові слова:** кліматичний ризик, викиди парникових газів, будівельна галузь, воєнні дії.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.45-52>

## Вступ

Визначення кліматичних ризиків для окремих галузей економіки останнім часом широко обговорюється в роботах вітчизняних та закордонних авторів, в тому числі як основа системи їх кліматичного обслуговування [1-4 та інш.]. Кліматичний ризик у контексті зміни клімату визначається як потенційні несприятливі наслідки для людини або екологічних систем, що включають наслідки для життя, засобів існування, здоров'я та добробуту, економічних, соціальних і культурних активів та інвестицій, інфраструктури, послуг (включаючи екосистемні послуги), екосистем і видів [1, 5-7]. На основі довгострокових світових моніторингових баз даних та оціночних звітів щодо глобальних кліматичних змін [8-10 та інш.] низкою світових та вітчизняних авторів розроблено концептуальні та прогнозні методики визначення кліматичних ризиків економік держав в найближчому майбутньому [11-16].

Ці методики знайшли своє застосування в Україні без врахування викидів парникових газів (ПГ) внаслідок проходження воєнних дій на території держави, що є значущі [17-20]. Так, в третьому проміжному оцінюванні, що було здійснено завдяки підтримці Європейського кліматичного фонду (ECF) та «Ініціативи з розвитку екологічної політики й адвокації в Україні» (EPAIU), зазначені викиди ПГ за 555 днів війни в сумі 150 млн тонн CO<sub>2</sub> екв., що становить більше, ніж річні викиди ПГ у такій високоіндустріальній європейській країні, як Бельгія [17]. Враховуючи середню "тіньову ціну" на викиди вуглецю у 64 дол. США/тонн CO<sub>2</sub> екв. за 2022–2023 рр., загальна шкода клімату, яку Російська Федерація завдала за 1000 днів війни, становитиме близько 17,3 млрд дол. США. Як відмічається в звіті ECF та EPAIU [17],

повоєнне відновлення пошкодженої та зруйнованої цивільної інфраструктури має стати найбільшим вуглецевоємним джерелом в державі. Тільки руйнування греблі у Новій Каховці, спричинена ним повінь нижче за течією та спорожнення водосховища заповдіяли загальний рівень шкоди в розмірі 54,7 млн тонн CO<sub>2</sub> екв., який продовжує зростати.

В будівельній галузі компенсація щодо пом'якшення кліматичної шкоди, завданої воєнними діями Росії, повинна бути націлена на зменшення майбутніх викидів від будівництва на всіх стадіях життєвого циклу, зокрема, які пов'язані із використанням цементу та сталі, отримання стимулів для низьковуглецевої відбудови, краще утеплення будівель і впровадження відновлюваних джерел енергії. Викиди від низьковуглецевої відбудови пошкоджених будівель та інфраструктури не можуть бути зведені до нуля, але їх можна суттєво мінімізувати за допомогою застосування сталих та низьковуглецевих технологій та матеріалів для відновлювальних робіт, що, в свою чергу, вимагає кількісного та якісного визначення кліматичних ризиків будівельної галузі.

**Постановка проблеми.** Існуючі методики та нормативні документи визначення кліматичних ризиків для різних галузей економіки відрізняються за своєю складністю і глибиною аналізу, переліком індикаторів, алгоритмами отримання кількісних оцінок та характеристиками систем, що оцінюються [11-16]. Завдяки своїй структурованості, відносній простоті та універсальності, методологія, що представлена Німецьким товариством міжнародного співробітництва (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH), вважається однією з кращих, розроблених на даний момент [21]. В Україні Наказом Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 03.06.2023 р. № 386 затверджено Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату [16]. Рекомендації розроблено на виконання другого пункту Операційного плану реалізації у 2022-2024 році Стратегії екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату (Розпорядження Кабінету Міністрів України від 20.10.2021 № 1363).

Трирівневий підхід до оцінки ризиків і вразливості до зміни клімату покладено в основу Методичних рекомендацій як такий, що оптимально використовує обмежені адаптаційні ресурси системи.

Метою даних досліджень є здійснення оцінки ризиків і вразливості до зміни клімату енергоефективності будівельного сектору на основі існуючих Методичних рекомендацій з врахуванням викидів ПГ, що спричинено воєнними діями в Україні.

Для реалізації створення низьковуглецевого будівництва при післявоєнній відбудові держави, в даному дослідженні за допомогою кількісних змін в енергоспоживанні на 1 м<sup>2</sup> будівлі для холодного та жаркого періоду року проаналізовано ризик змін в енергоспоживанні як у зимовий, так і у літній періоди та окреслено можливі заходи з адаптації будівельного сектору з врахуванням викидів ПГ внаслідок воєнних дій в Україні.

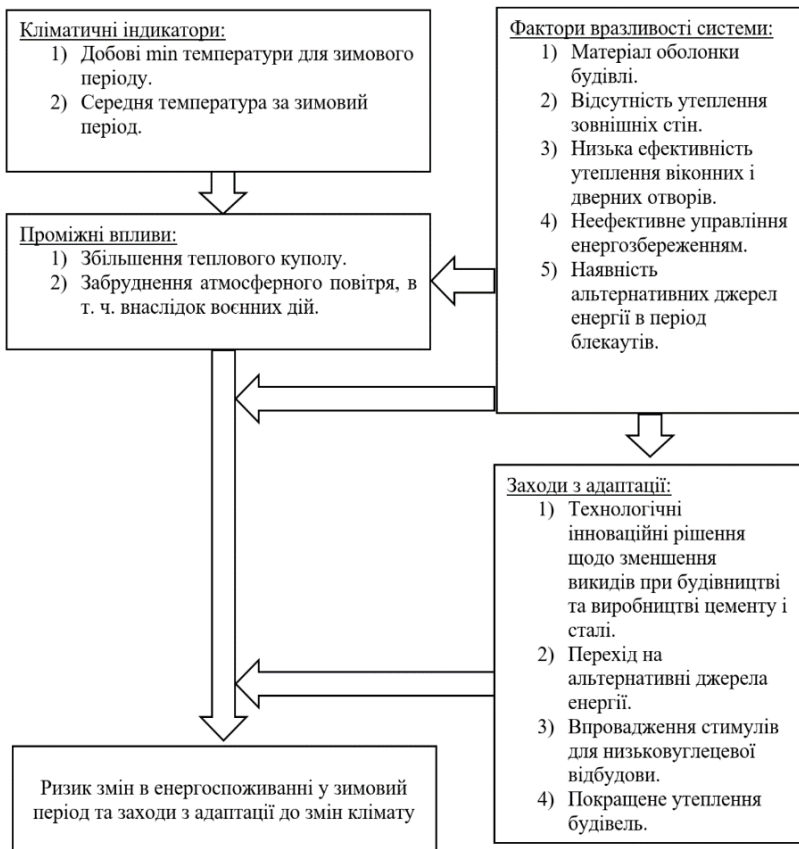
## **Результати досліджень**

В якості кліматичних показників для вирішення даної задачі обрано наступні кліматичні індикатори: середня температура за зимовий та літній періоди; добові мінімальні температури для зимового періоду; добові максимальні

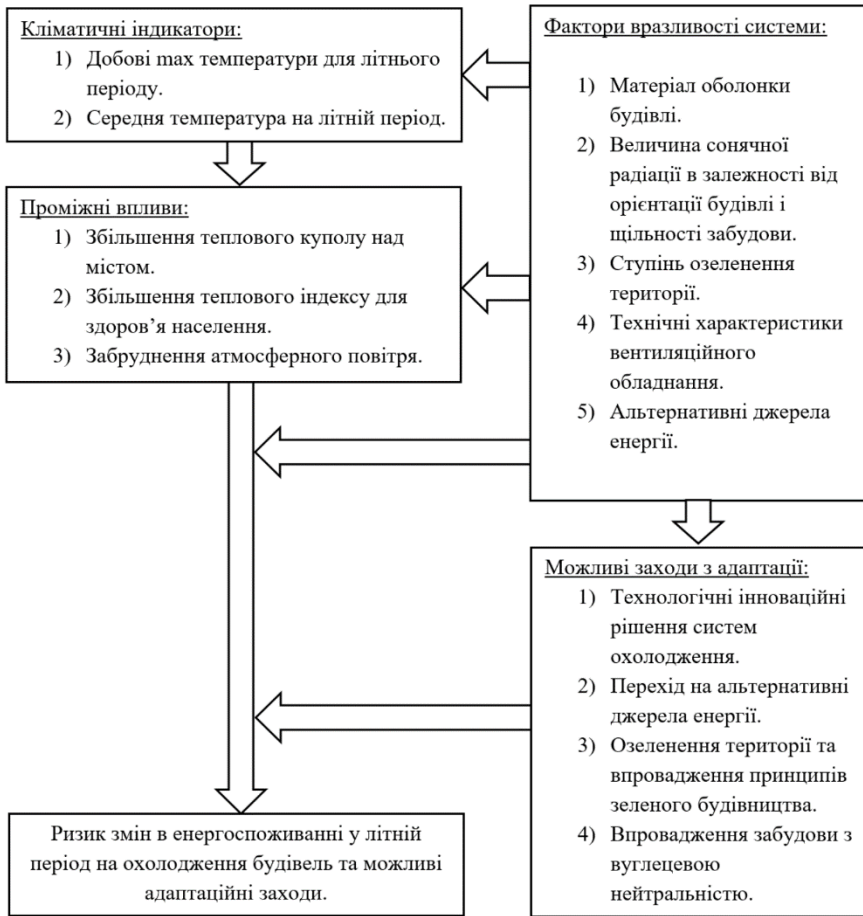


температури для літнього періоду. Попередні розрахунки динаміки змін споживання енергії на опалення в зимовий період для м. Києва показали, що зміна клімату, починаючи з 1942 року, призвела до зниження споживання енергії за два зимові місяці для звичайного панельного будинку з площею стін 200 квадратних метрів майже на 16%. Що стосується енерговитрат на охолодження в спекотний період, то розрахунки засвідчили їх поступове зростання останнім десятиліттям при інших рівних умовах. Для м. Києва було зроблено моделювання підвищення температурних показників за допомогою програмного продукту OriginPro8 та баз даних [8, 9], що засвідчило прогнозну динаміку середньомісячної температури за звичайним та за вологим термометром у липні в 2050 році відповідно – 26,371°C і 28,918°C. Отримані дані свідчать про необхідність внесення корегувальних змін в додатки нормативних документів, зокрема, що стосуються значень середньомісячної температури в розрахунках енергоефективності будівлі при інших рівних умовах, наприклад, розрахунку енерговитрат на кондиціонування повітря в приміщенні згідно з ДСТУ 9190:2022 «Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання».

Приклад ланцюжків впливу на кліматичний ризик, розроблених у рамках оцінювання кліматичних факторів, що впливають на розрахункові дані енергоспоживання будівлі на стадії проекту в зимовий та літній періоди, представлено на рис. 1.



(A)



(Б)

Рис. 1. Ризик змін в енергоспоживанні для будівельного сектору на опалення у зимовий період (А) та на охолодження у літній період (Б) та можливі заходи з адаптації до змін клімату

В даному прикладі було включено в категорію проміжних впливів також вплив воєнних дій на міське середовище і населення. Оцінити цей вплив можна завдяки існуючим моніторинговим базам даних наземних та дистанційних спостережень. Фактори вразливості системи потребують детального якісного та кількісного аналізу кожного її пункту з врахуванням технічних можливостей. Наприклад, аналіз технології виробництва цементу («мокрим» традиційним або «сухим» способом), що дозволяє значно скоротити викиди ПГ при оцінці життєвого циклу будівлі. Можливі заходи з адаптації аналізуються на стадії проєкту відбудови, що дозволить максимально скоротити викиди в атмосферне повітря.

Визначення інтегрального значення шуканого кліматичного ризику відбувається шляхом об'єднання визначених величин компонентів ризику (загрози, вразливість, перебування під дією) відповідно до діючих нормативних документів.

## Висновки

Проведені дослідження дають підставу зробити наступні висновки:

1. Сучасні методи адаптації до кліматичних змін у різних галузях економіки, в т.ч. і для будівельної галузі, спираються на концепцію ризиків і вразливості, викладену в оціночних доповідях AR4 та AR5.

2. На прикладі міського середовища м. Києва отримані ланцюжки впливу на ризик впливу на енергоспоживання будівлі на стадії проєкту в зимовий та літній періоди.

3. Дані дослідження можуть бути перспективними в подальшому для пошуку шляхів зменшення викидів ПГ в атмосферне повітря, компенсації щодо пом'якшення кліматичної шкоди, завданої воєнними діями Росії, та нейтралізації цього впливу на всіх стадіях життєвого циклу, враховуючи виробництво цементу та сталі, краще утеплення будівель і впровадження відновлюваних джерел енергії у сучасних будівлях та спорудах.



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



Публікація підготовлена в рамках проєкту «Багаторівнева місцева, національна та загальнорегіональна освіта та навчання в галузі кліматичних послуг, адаптації та пом'якшення наслідків зміни клімату 619285-EPP-1-2020-1-FI-EPPKA2-SVNE-JP». Підтримка Європейською комісією випуску цієї публікації не означає схвалення змісту, який відображає лише думки авторів, і Комісія не може нести відповідальність за будь-яке використання інформації, що міститься в ній.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату: монографія / за ред. С.М. Степаненка, А.М. Польового. ОДЕКУ. Одеса: ТЕС, 2018. 548 с.
2. Watkiss, P. and Betts, R.A. (2021) Method. In: The Third UK Climate Change Risk Assessment Technical Report [Betts, R.A., Haward, A.B. and Pearson, K.V. (eds.)]. Prepared for the Climate Change Committee, London.
3. Climate risk report for the Middle East and North Africa (MENA) region. – MetOffice/Hadley Centre, 2021. 111 pp.
4. ДСТУ EN ISO 14091:2022 Адаптація до зміни клімату. Рекомендації щодо оцінювання вразливості, впливу та ризику (EN ISO 14091:2021, IDT; ISO 14091:2021, IDT).
5. AR 6, (IPCC, 2021). Adaptation to climate change. Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment.
6. ДСТУ ISO 31000:2018 Менеджмент ризиків. Принципи та настанови (ISO 31000:2018, IDT).
7. Необхідність врахування глобальних змін клімату при розрахунку класу енергоефективності будівель / Степаненко С.М., Волошкіна О.С., Мальований М.С., Ковальова А.В. // V Міжнародна Наук.-Практ. Конференція “Енергоощадні машини і технології”, 22 по 24 травня 2024 КНУБА, – С. 199–202. <http://esmt.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/ESMT-2024-Conference-proceedings.pdf>
8. Кліматична база даних Центральної геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського. URL: <http://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/>

9. Climate Data Store – ERA5 explorer. Climate Change Service Copernicus. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/apps/c3s/app-era5-explorer>
10. Перелік міжнародних кліматичних індикаторів. URL: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/europeanclimate-data-explorer/overview-list>
11. Estada, F., Gay, C., Conde, C. (2012). A methodology for the risk assessment of climate variability and change under uncertainty. A case study: coffee production in Veracruz, Mexico. – *Clim. Change*, 113: 455–479. doi:10.1007/s10584-011-0353-9
12. Methodological approach considering different factors influencing vulnerability – Pan-European scale. – DROUGHT-R&SPI, Tech.Report No 26, 2015. 111 pp.
13. Parathoma-Kohle, M., Promper C., Glad, T. (2016). A Common Methodology for Risk Assessment and Mapping of Climate Change Related Hazards – Implications for Climate Change Adaptation Policies. – *Climate*, 4, 8. doi:10.3390/cli4010008
14. Кона А., Бертольдї П та інш. (2018). Керівництво «Як розробити План дій по сталому енергетичному розвитку і клімату в країнах Східного партнерства». Європейська комісія, Об'єднаний дослідницький центр Угоди Мерів по клімату і енергії 113659. [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en)
15. Masum, J.H. (2019). Climate Change Risk Assessment: Exploring the current state of knowledge to assess climate change risks from local to national level, Coastal Development Partnership (CDP), Bangladesh, ISBN: 978-984-34-7046-1
16. Методичні рекомендації для здійснення оцінки ризиків та вразливості соціально-економічних секторів та природних складових до зміни клімату. Наказ Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України від 03.06.2023 р. No 386. <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/06/386nd1.pdf>
17. Вплив російської війни в Україні на клімат. 24 лютого 2022 – 1 вересня 2023. Ініціатива з обліку викидів парникових газів внаслідок війни. Звіт завдяки підтримці Європейського кліматичного фонду (ECF) та «Ініціативи з розвитку екологічної політики й адвокації в Україні» (EPAIU). [https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/01/Report-2023\\_December\\_UA\\_compressed.pdf](https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/01/Report-2023_December_UA_compressed.pdf)
18. Low-carbon warfare: climate change, net zero and military operations. <https://academic.oup.com/ia/article/99/2/667/7024982>
19. Вплив російської війни в Україні на клімат, перше проміжне оцінювання. Англійською: <https://en.ecoaction.org.ua/climate-damage-caused-by-russias-war.html>. Українською: <https://ecoaction.org.ua/vplyv-ros-vijny-na-klimat.html>
20. Вплив російської війни в Україні на клімат, друге проміжне оцінювання. Англійською: <https://en.ecoaction.org.ua/climate-damage-by-russia-12-months.html>. Українською: <https://ecoaction.org.ua/vplyv-ros-vijny-na-klimat-2.html>
21. The Vulnerability Sourcebook – Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. GIZ, adelphi, EURAC. Eppelheim, 2014.

*Стаття надійшла до редакції 16.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 02.09.2024*

## REFERENCES

1. Stepanenko, S.M., & Polyovoy, A.M. (2018). Climatic risks of the functioning of sectors of the economy of Ukraine in the context of climate change: monograph. ODEKU. Odesa: TES [in Ukrainian].
2. Watkiss, P. and Betts, R.A. (2021). Method. In: The Third UK Climate Change Risk Assessment Technical Report [Betts, R.A., Haward, A.B. and Pearson, K.V. (eds.)]. Prepared for the Climate Change Committee, London.
3. Climate risk report for the Middle East and North Africa (MENA) region. (2021). MetOffice/Hadley Centre.
4. DSTU EN ISO 14091:2022 Climate Change Adaptation: Guidelines for Vulnerability, Impact and Risk Assessment (EN ISO 14091:2021, IDT; ISO 14091:2021, IDT).

5. AR 6, IPCC. (2021). Adaptation to climate change. Guidelines on vulnerability, impacts and risk assessment.
6. DSTU ISO 31000:2018 Risk Management: Principles and Guidelines (ISO 31000:2018, IDT).
7. Stepanenko, S.M., Voloshkina, O.S., Malovany, M.S., & Kovaleva, A.V. (2024). The need to take into account global climate change when calculating the energy efficiency class of buildings. In V International Scientific and Practical Conference “Energy-saving machines and technologies”, May 22-24, 2024, KNUBA (pp. 199-202) [in Ukrainian]. <http://esmt.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/09/ESMT-2024-Conference-proceedings.pdf>
8. Climatic database of the B. Sreznovsky. Central Geophysical Observatory. Retrieved from <http://cgo-sreznovskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/>
9. Climate Data Store – ERA5 explorer. Climate Change Service Copernicus. Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/apps/c3s/app-era5-explorer>
10. List of international climate indicators. Retrieved from <https://climate-adapt.eea.europa.eu/en/knowledge/europeanclimate-data-explorer/overview-list>
11. Estada, F., Gay, C., & Conde, C. (2012). A methodology for the risk assessment of climate variability and change under uncertainty. A case study: coffee production in Veracruz, Mexico. *Clim. Change*, 113: 455-479. doi:10.1007/s10584-011-0353-9
12. Methodological approach considering different factors influencing vulnerability. (2015). Pan-European scale. DROUGHT-R&SPI, Tech.Report No 26.
13. Papatoma-Kohle, M., Promper, C., & Glad, T. (2016). A Common Methodology for Risk Assessment and Mapping of Climate Change Related Hazards – Implications for Climate Change Adaptation Policies. *Climate*, 4, 8. doi:10.3390/cli4010008
14. Kona, A., Bertoldi, P. et al. (2018). Guidance «How to develop a Sustainable Energy and Climate Action Plan in the Eastern Partnership countries». European Commission, Joint Research Centre of the Covenant of Mayors for Climate and Energy 113659. Retrieved from [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en)
15. Masum, J.H. (2019). Climate Change Risk Assessment: Exploring the current state of knowledge to assess climate change risks from local to national level. Coastal Development Partnership (CDP), Bangladesh. ISBN: 978-984-34-7046-1
16. Methodological recommendations for assessing risks and vulnerability of socio-economic sectors and natural components to climate change (2023). Order of the Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine dated 03.06.2023. No. 386. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/06/386nd1.pdf>
17. The Climate Impact of the Russian War in Ukraine. February 24, 2022 – September 1, 2023. Greenhouse Gas Emissions Accounting Initiative. Report supported by the European Climate Fund (ECF) and the Environmental Policy and Advocacy Initiative in Ukraine (EPAIU). [https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/01/Report-2023\\_December\\_UA\\_compressed.pdf](https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2024/01/Report-2023_December_UA_compressed.pdf)
18. Low-carbon warfare: climate change, net zero and military operations. Retrieved from <https://academic.oup.com/ia/article/99/2/667/7024982>
19. Climate Impact of the Russian War in Ukraine, First Interim Assessment. In English: <https://en.ecoaction.org.ua/climate-damage-caused-by-russias-war.html>. In Ukrainian: <https://ecoaction.org.ua/vplyv-ros-vijny-na-klimat.html>
20. Climate Impact of the Russian War in Ukraine, Second Interim Assessment. In English: <https://en.ecoaction.org.ua/climate-damage-by-russia-12-months.html>. In Ukrainian: <https://ecoaction.org.ua/vplyv-ros-vijny-na-klimat-2.html>
21. The Vulnerability Sourcebook – Concept and guidelines for standardised vulnerability assessments. (2014). GIZ, adelphi, EURAC. Eppelheim.

*The article was received 16.05.2024 and was accepted after revision 02.09.2024*

**Гончаренко Артем Вадимович**

аспірант спеціальності 101 «Екологія», кафедри охорони праці та навколишнього середовища Київського національного університету будівництва і архітектури  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5647-1360> **e-mail:** [hosting.pat@gmail.com](mailto:hosting.pat@gmail.com)

UDC 628.16.08

**Kostiantyn Shumbar**, postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0201-2142> **e-mail:** k.w.shumbar@gmail.com

**Andrii Shcherbak**, postgraduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4594-6412> **e-mail:** andron.vr@gmail.com

**Marina Kravchenko**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

**Lesya Vasylenko**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor

**e-mail:** lesya.kiev@ukr.net

**Julia Berezhnytska**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** juli\_mmm@ukr.net

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **INFLUENCE OF OPERATING PARAMETERS ON THE PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANES: MODELLING WITH THE SOLUTION-DIFFUSION MODEL**

**Abstract.** *This work is devoted to the study of the influence of the main operating parameters (pressure, concentration, temperature) on the performance of reverse osmosis membranes and the use of the solution-diffusion transport model to predict their efficiency. The study provides a classification of reverse osmosis transport models for describing the flow of dissolved solutes and solvents through the membrane. The most common model for describing the transport of aqueous dilute solutions and salts in dense, non-porous polymers is the solution-diffusion model. This model allows for the prediction of the efficiency of solute retention depending on the applied external and osmotic pressure across the membrane, and salt transport is determined by the concentration gradient between the initial solution and the permeate. A scheme of the reverse osmosis process is presented, which includes: the profile of pressure, chemical potential and solvent activity at the solution-membrane interface in the solution-diffusion model; solvent behaviour in the membrane under pressure; division of the system into physical and chemical properties of the solvent and the solute inside the membrane. It is shown that the effect on permeability and solute retention is the result of the interaction of several factors, including the feed/operating temperature, which affects the membrane porosity, the concentration of the initial dilute aqueous solution, and the transmembrane pressure, which contributes to membrane compaction. It was found that an increase in the operating pressure leads to an increase in the driving force, which increases the water flow and the efficiency of solute retention. It was found that an increase in transmembrane pressure from 100 to 500 kPa increases salt retention from 82% to 94%, and the degree of salt retention decreases with an increase in solution temperature from 25 to 45 °C. It was found that with an increase in salt concentration from 1% to 8%, the degree of salt retention decreases from 99.5% to 97.8%. It is shown that the optimum permeation flux is observed at a temperature of 35 °C, especially 70 minutes after the start of operation, and the permeation flux decreases with time.*

**Keywords:** *dilute aqueous solutions, reverse osmosis, polymeric membrane, operating parameters, pressure, concentration, temperature, performance.*

К.В. Шумбар, А.І. Щербак, М.В. Кравченко, Л.О. Василенко, Ю.О. Березницька

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

## ВПЛИВ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗВОРотноОСМОТИЧНИХ МЕМБРАН: МОДЕЛЮВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ МОДЕЛІ «РОЗЧИН-ДИФУЗІЯ»

***Анотація.** Ця робота присвячена дослідженню впливу основних робочих параметрів (тиску, концентрації, температури) на продуктивність зворотноосмотичних мембран і використанню транспортної моделі «розчин-дифузія» для прогнозування їх ефективності. У дослідженні наведено класифікацію моделей транспорту зворотного осмосу для опису потоків розчинених речовин і розчинників через мембрану. Найпоширенішою моделлю для опису переносу водних розбавлених розчинів і солей у щільних непористих полімерах є модель на основі механізму «розчин-дифузія». Ця модель дозволяє спрогнозувати ефективність затримання розчинених речовин залежно від прикладеного зовнішнього та осмотичного тиску через мембрану, а транспорт солей визначається градієнтом концентрації між вихідним розчином і пермеатом. Наведено схему процесу зворотного осмосу, яка включає: профіль тиску, хімічного потенціалу та активності розчинника на межі розділу розчин-мембрана в моделі «розчин-дифузія»; поведінку розчинника в мембрані під тиском; поділ системи на фізико-хімічні властивості розчинника та розчиненої речовини всередині мембрани. Показано, що вплив на проникність і затримання розчинених речовин є результатом взаємодії кількох факторів, зокрема температури подачі/експлуатації, яка впливає на пористість мембрани, концентрації вихідного розбавленого водного розчину, а також трансмембранного тиску, що сприяє ущільненню мембрани. Встановлено, що збільшення робочого тиску призводить до зростання рушійної сили, що підвищує потік води та ефективність затримання розчинених речовин. Досліджено, що підвищення трансмембранного тиску від 100 до 500 кПа збільшує затримання солі з 82% до 94%, а ступінь затримки солі зменшується зі збільшенням температури розчину з 25 до 45 °С. Виявлено, що зі збільшенням концентрації солі з 1% до 8% ступінь затримки солі зменшується з 99.5% до 97.8%. Показано, що оптимальний потік проникнення спостерігається при температурі 35 °С, особливо через 70 хвилин після початку роботи, а з часом потік проникнення зменшується.*

***Ключові слова:** розбавлені водні розчини, зворотний осмос, полімерна мембрана, робочі параметри, тиск, концентрація, температура, продуктивність.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.53-64>

### Вступ

Чиста вода є обмеженим і цінним ресурсом, оскільки лише приблизно 2,5% води на Землі придатні для безпосереднього використання та споживання людиною [1]. Нині спостерігається суттєвий дисбаланс між потребою в чистій воді та її доступністю, причому приблизно чверть світового населення відчуває економічний дефіцит водних ресурсів [2]. Прогнози показують, що до 2030 року майже половина населення Землі може опинитися в умовах дефіциту води [3]. Проблема загострюється через зростання населення, індустріалізацію, розширення сільського господарства, забруднення водних

об'єктів, неефективне управління водними ресурсами та зміну клімату [4]. Вирішення проблеми дефіциту води потребує впровадження нових підходів і вдосконалення альтернативних технологій, таких як опріснення [5]. Цей процес передбачає видалення солей і мінералів з морської чи солонуватої води для отримання води, придатної для споживання та використання в промисловості [6]. Суворі норми щодо якості питної води, встановлені різними урядами, стимулюють удосконалення установок для опріснення та підвищення їх ефективності [7].

Традиційні методи термічного опріснення, такі як багатоступеневе швидке випаровування, дистиляція з множинним ефектом та термічне стиснення пари, використовують процеси зміни фаз для виробництва прісної води [8]. Проте ці методи є енергоємними та мають високі капітальні й експлуатаційні витрати, оскільки залежать від теплової енергії, здебільшого з викопного палива [9]. Наприклад, виробництво 1000 м<sup>3</sup>/добу прісної води за допомогою термічного опріснення може споживати до 10 000 тонн викопного палива щорічно [10].

З розвитком мембранних технологій мембранні процеси стали найперспективнішими методами для опріснення води завдяки їх високій енергетичній ефективності [11]. Ці процеси також відрізняються компактністю, простотою експлуатації, відносно низькою вартістю водопідготовки та можливістю легкої автоматизації [12, 13]. Мембранні процеси, керовані тиском, використовують напівпроникні мембрани для очищення води, при цьому молекули води проходять через мембрану, а солі затримуються [14]. Мембранна технологія революціонізувала сферу розділення водних розчинів, забезпечуючи високу селективність та економічно вигідну альтернативу традиційним процесам очищення [15]. До найбільш поширених мембранних процесів належать зворотний осмос, нанофільтрація і мембранна дистиляція [16].

Зворотний осмос є технологією очищення води, яка використовує напівпроникну полімерну мембрану для видалення іонів, білків, неорганічних та органічних хімічних речовин, що зазвичай важко видалити іншими традиційними методами [17]. Продуктивність та ефективність розділення зворотноосмотичними мембранами значною мірою залежать від транспорту розчинника та розчинених речовин через мембрани [18]. Фундаментальне розуміння цих процесів є ключовим для інтерпретації експериментальних спостережень і розробки високоефективних матеріалів. Проте, незважаючи на тривалу історію використання полімерних мембран зворотного осмосу та їх широке застосування, сучасні моделі транспорту все ще знаходяться на етапі розвитку, і жодна з існуючих моделей наразі не може бути застосована для широкого спектру умов [19].

Було розроблено кілька моделей механізмів транспорту зворотного осмосу для опису потоків розчинених речовин і розчинників через мембрани. Загальна мета таких моделей масопереносу полягає у зв'язку потоків з умовами експлуатації. Фундаментальне розуміння механізму транспорту є ключовим для оцінки продуктивності мембран і розробки нових високоефективних мембранних матеріалів, що відповідають потребам різних сучасних застосувань та зростаючим вимогам до процесів розділення. Для досягнення цієї мети модель повинна бути інтегрована з певними транспортними коефіцієнтами, які часто визначаються на основі експериментальних результатів.



Моделі переносу водних розбавлених розчинів через мембрани можна розділити на три основні категорії:

1) Феноменологічні моделі транспорту, які не залежать від конкретного механізму і базуються на теорії необоротної термодинаміки, наприклад моделі Кедема–Шпіглера [20].

2) Непористі транспортні моделі, в яких мембрана являє собою непористий або гомогенний матеріал. До цієї категорії належать моделі «розчин-дифузія», розширена «розчин-дифузія» та модель «розчин-дифузія» з неідеальністю [21].

3) Пористі транспортні моделі, в яких мембрана вважається пористою. Сюди входять моделі переважного сорбційного капілярного потоку, аналіз Кімури – Суриджана, а також дрібнопористий і поверхневий потік через пори мембран [22].

Хоча такі моделі були розроблені для електролітів, вони також підходять для інших розчинених речовин. Різні дослідження показують, що зміни в мембранах можуть спричинити специфічність до розчинених речовин та нелінійність транспорту. Складніші моделі мембранного транспорту виходять за межі цього дослідження, однак було виявлено, що нелінійності можуть виникати через набухання або стискання полімерів, електростатичні взаємодії або інші нелінійності в транспорті через полімерні мембрани.

Найпоширенішою моделлю для опису переносу водних розбавлених розчинів і солей в щільних непористих полімерах є модель, запропонована Мертеном і Лонсдейлом на основі механізму «розчин-дифузія» [23]. Відповідно до цієї моделі, транспорт води залежить від прикладеного зовнішнього тиску та осмотичного тиску через мембрану. Транспорт солей через мембрану визначається градієнтом концентрації між вихідним розчином і пермеатом. Ця спрощена структура включає класичне значення коефіцієнта транспортування води і феноменологічне значення коефіцієнта транспортування солей та підтверджена численними експериментальними результатами [24]. Модель «розчин-дифузія» забезпечує основні транспортні рівняння, засновані на теоріях, розроблених для ідеальних розбавлених розчинів.

Ця модель успішно застосовувалася для опису ефективності мембран і транспорту кількох розчинених речовин [25], особливо у випадках, коли мембрани демонстрували нижчу роздільну здатність, ніж прогнозувалося на основі вимірювань розчинності та дифузії.

Однак, вона ігнорує кілька важливих аспектів через спрощені припущення, що обмежує будь-яке фундаментальне тлумачення перенесення води і солей під час зворотного осмосу [26]. Ще один недолік класичної моделі «розчин-дифузія» полягає в тому, що рушійні сили переносу солей спрощені градієнтом тиску або концентрації, а не градієнтом хімічного потенціалу, що враховується в рівнянні коефіцієнта активності, запропонованому в роботі [27].

Ефективність зворотноосмотичних систем значною мірою залежить від конструктивних особливостей та умов експлуатації, а наявність моделей зворотного осмосу є ключовим аспектом для їх проектування. Прогнозування впливу умов експлуатації на продуктивність мембран вимагає використання однієї з транспортних моделей, наприклад моделі «розчин-дифузія», параметри якої дозволяють оцінити вплив робочих умов на процес зворотного осмосу.

**Метою** дослідження є аналіз впливу основних робочих параметрів (тиску, концентрації, температури) на продуктивність зворотноосмотичних мембран та використання транспортної моделі «розчин-дифузія» для прогнозування їх ефективності.

### Основна частина

Схему процесу зворотного осмосу, який складається з кількох етапів, зображено на рисунку 1. На рис. 1, а показано профілі температури, хімічного потенціалу ( $\mu$ ) та активності ( $a$ ) розчинника на межі розділу «розчин-мембрана». Відображено різницю тисків  $P_t$  та  $P_p$  між водним розбавленим розчином та пермеатом. Розчинник (вода) проходить через мембрану, рухаючись у напрямку градієнтів хімічного потенціалу та активності, які змінюються вздовж товщини мембрани, від розбавленого водного розчину до пермеату. Рисунок 1, б ілюструє процес транспорту розчинника під дією тиску  $P_t$ . Молекули води, рухаючись під прикладеним тиском, проходять через пори мембрани, відокремлюючись від розчинених речовин. Рисунок 1, в демонструє розподіл фізико-хімічних властивостей між чистим розчинником та мембраною. Показано, як тиск  $P_t$ , температура, а також інші фізико-хімічні параметри визначають поведінку розчинника та його взаємодію з мембраною.

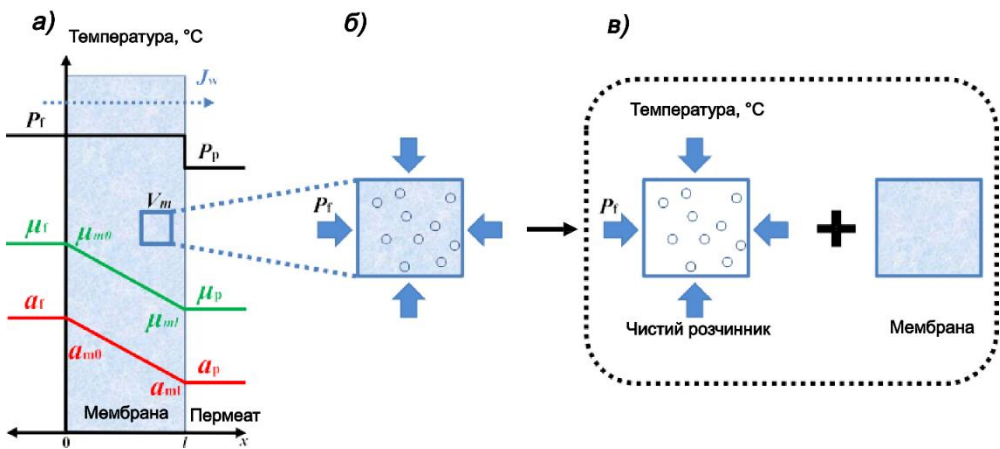


Рис. 1. Схематичне зображення процесу зворотного осмосу: а) профіль тиску, хімічного потенціалу та активності розчинника на межі розділу розчин-мембрана в моделі «розчин-дифузія»; б) поведінка розчинника в мембрані під тиском; в) поділ системи на фізико-хімічні властивості розчинника та розчиненої речовини всередині мембрани

Перенесення маси, що визначає атомний або молекулярний транспорт через межу розділу в одному напрямку, виражено в рівнянні (1):

$$J_i = -D \frac{dC_i}{dx}, \quad (1)$$

де  $J_i$  – потік компонента  $i$ ;  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $\frac{dC_i}{dx}$  – градієнт концентрації компонента  $i$ , а  $x$  – товщина мембрани.

Швидкості прямої та зворотної дифузії через межу розділу виражені в рівнянні (2):

$$J_i = -D(D_i^f C_i^f - D_i^m C_i^m), \quad (2)$$

де градієнт концентрації описано в рівнянні (4). Тут нижній індекс позначає розчинену речовину, а верхній індекс позначає фазу.

У кінетичній транспортній моделі статичний рівноважний розподіл через будь-яку межу мембрани досягається, коли активність кожної розчиненої речовини дорівнює  $a_i^f = a_i^m$ . Стаціонарна рівновага виникає, коли хімічний потенціал на межі розділу мембрани є рівним. Це досягається як у моделі Мертена, так і в моделі активності шляхом включення хімічного потенціалу в подальший аналіз транспортування. Активність визначається як концентрація, помножена на коефіцієнт активності ( $a_i = m_i \cdot \gamma_i$ ), а аналітична термодинамічна залежність між активністю та хімічним потенціалом змінює активність. Це забезпечує врахування всіх ефектів завдяки включенню хімічного потенціалу в модель активності, що призводить до наступного загального рівняння мембранного потоку (рівняння 3):

$$J_i = \frac{D}{\varphi \gamma_i^m} (\gamma_i^f C_i^f - \gamma_i^m C_i^m) = B_a (\gamma_i^f C_i^f - \gamma_i^m C_i^m), \quad (3)$$

де  $B_a$  – це проникність розчиненої речовини, яка враховує як активність, так і концентрацію. Це рівняння застосовне для солей та будь-яких інших розчинених речовин або розчинників. Активність солей і розчинених речовин залежить від тиску, температури та концентрації. Перевага використання рівняння переносу (рівняння 3), полягає в тому, що коефіцієнт активності можна розділити на кілька фізичних компонентів, таких як нелінійні ефекти через стисливість пари, стисливість рідини та зміни молярного об'єму. Зв'язок між активністю та хімічним потенціалом дозволяє узгодити підхід дифузії розчину з моделлю активності. Водно-специфічне співвідношення описано рівнянням 4:

$$\mu_w = \mu_w^0 + RT \ln a_w, \quad (4)$$

де  $\mu$  – хімічний потенціал;  $T$  – температура;  $R$  – універсальна газова стала.

У моделі «розчин-дифузія» загальною рушійною силою, що забезпечує транспортування компонента через щільну мембрану, є градієнт хімічного потенціалу, як описано в рівнянні (5):

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx}, \quad (5)$$

де  $J_i$  – потік компонента  $i$ ;  $L_i$  – коефіцієнт пропорційності між потоком і рушійною силою;  $\mu_i$  – хімічний потенціал компонента  $i$ , а  $x$  – товщина мембрани.

Модель «розчин-дифузія» передбачає, що (1) поверхневий шар мембрани є однорідним і неперистим, і (2) як розчинена речовина, так і розчинник розчиняються в цьому шарі, а потім дифундують через нього незалежно один від одного. Потоки води та розчинених речовин пропорційні градієнту їхнього

хімічного потенціалу, який виражається через різницю тиску та концентрації для розчинника, а для розчиненої речовини – через різницю концентрацій по обидві сторони мембрани:

$$f_v = A \cdot (\Delta P - \Delta \pi), \quad (6)$$

де  $f_v$  – об'ємний потік розчинника,  $L/h \cdot m^2$ ;  $A$  – константа гідравлічної проникності, яка враховує характеристики мембрани та умови експлуатації системи;  $\Delta P$  – різниця тиску через мембрану (кПа);  $\Delta \pi$  – різниця осмотичного тиску через мембрану (кПа).

Якщо  $A = A_D D$ , де  $A_D D$  – проникність розчинника без коефіцієнта дифузії ( $D$ ), то з рівняння (6) отримуємо:

$$f_v = A_D D \cdot (\Delta P - \Delta \pi), \quad (7)$$

$$f_s = B \cdot \Delta C, \quad (8)$$

де  $f_s$  – потік розчиненої речовини, керований градієнтом концентрації ( $\Delta C$ ) через мембрану, а  $B$  – коефіцієнт проникності розчиненої речовини.

Ефективність затримання солей або розчинених речовин мембраною у водному розчині розраховується за формулою (9):

$$R = \left[ 1 - \frac{\rho_v \cdot B}{A \cdot (\Delta P - \Delta \pi)} \right] \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $\rho_v$  – густина води,  $кг/м^3$ ;  $B$  – константа проникності солей або розчинених речовин.

Використовуючи транспортну модель «розчин-дифузія» було змодельовано вплив різних робочих умов на продуктивність мембрани. На рис. 2, а показано залежність потоку водного розчину через мембрану та ефективності затримання солей 3,5% NaCl від тиску.

Збільшення робочого тиску призводить до зростання рушійної сили, що підвищує потік води (як показано в рівнянні (6)) та ефективність затримання солей або розчинених речовин (згідно з рівнянням (9)). При тиску, рівному осмотичному, потік води наближається до нуля. Підвищення трансмембранного тиску від 100 до 500 кПа призводить до збільшення затримання солі з 82% до 94%. Оскільки зворотньоосмотичні мембрани не можуть повністю утримати всі розчинені солі у вихідному розчині, завжди присутня певна кількість солі, яка проходить через мембрану. При збільшенні тиску проникнення солі зменшується, оскільки вода проходить через мембрану швидше, що розбавляє концентрацію пермеату та збільшує відсоток відштовхування солей.

Рисунок 2, б демонструє вплив концентрації солі у вихідному розчині на ступінь затримки солі ( $R$  %). Виявлено, що зі збільшенням концентрації солі з 1% до 8% ступінь затримки солі зменшується з 99.5% до 97.8%. Автори [28] вказують на цікаву тенденцію зміни  $R$  зі зростанням концентрації: спочатку  $R$  збільшується (завдяки зниженню потоку, що зменшує явище поляризації концентрації), а потім зменшується (оскільки подальше зростання концентрації знижує рушійну силу та ефективність розділення).

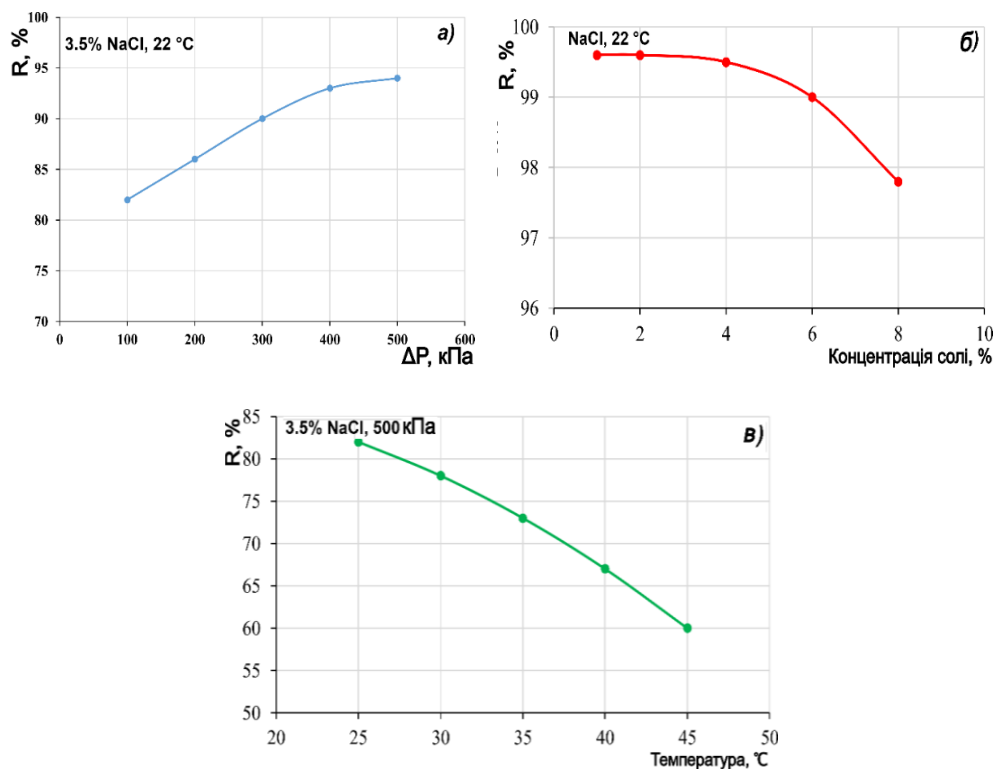


Рис. 2. Вплив тиску (а), концентрації солі NaCl при  $\Delta P = 100$  кПа (б) і температури (в) на продуктивність зворотньоосмотичних мембран

Вплив температури вихідного розчину (від 25 до 45 °C) на ступінь затримки солі показано на рисунку 2, в. Ступінь затримки солі мембраною зменшується при збільшенні температури розчину з 25 до 45 °C. Цей ефект пояснюється зниженням в'язкості вихідного розчину, що в свою чергу знижує концентрацію розчину на поверхні мембрани. У кількох роботах розглядався вплив температури на осмотичні показники. Автори [29] вивчили вплив температури на продуктивність мембрани при опрісненні, і їх результати підтвердили, що потік збільшується з підвищенням температури. Іншими науковцями [30] також було досліджено потік води через мембрану при температурах 25 °C і 35 °C за різних тисків, застосовуючи 1 М розчин NaCl. В ізобаричних умовах потік води збільшувався приблизно на 4,1% з підвищенням температури на кожен градус, тоді як питома потужність зростала на 3,4% на градус при збільшенні температури від 25 °C до 35 °C. Вони пояснили температурний ефект збільшенням водопроникності та сольової проникності, при цьому відзначивши, що співвідношення між ними залишалось близьким до постійного. Вони також дійшли висновку, що саме підвищена водопроникність є ключовим фактором для покращення потоку води. Крім того, було зазначено, що збільшення дифузії при вищих температурах зменшує внутрішню концентраційну поляризацію в мембрані, що також сприяло збільшенню потоку води.

Щодо впливу робочих параметрів на об'ємний потік проникнення розчинника через мембрани, рисунок 3, а показує, що тиск має найбільший вплив порівняно з іншими параметрами, такими як температура (рис. 3, б) та концентрація (рис. 3, в). Потік проникнення через мембрани зростає зі збільшенням трансмембранного тиску. Це пояснюється тим, що підвищення трансмембранного тиску сприяє проходженню більшої частини вихідного розчину через мембрану, в результаті чого виходить очищена вода (тобто потік проникнення зростає).

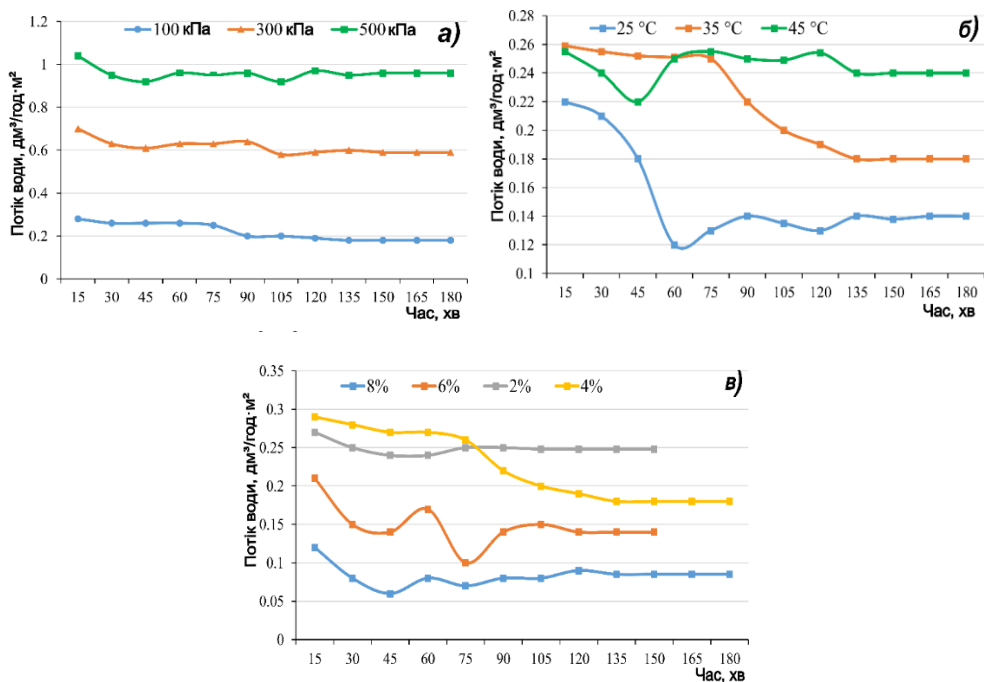


Рис. 3. Вплив тиску (а) (3.5%NaCl, 22°C); температури (б) (3.5%NaCl, 100 кПа) і концентрації солі (в) на потік проникнення (22°C, 100кПа)

Підвищення температури вихідного розчину призводить до збільшення потоку проникнення через мембрану зворотного осмосу. Це пов'язано зі зменшенням в'язкості та щільності води при підвищенні температури, що збільшує коефіцієнт проникності води, як було відзначено в роботі [31]. За результатами, представленими на рис. 3, б, можна зазначити, що оптимальний потік проникнення спостерігався при температурі 35 °C, зокрема через 70 хвилин після початку роботи, а з часом потік проникнення зменшувався. Це вказує на часові зміни в роботі мембрани при певних умовах.

Вплив концентрації солі вихідного розчину на потік проникнення показаний на рис. 3, в. Зменшення потоку проникнення спостерігається зі збільшенням концентрації солі, що пов'язано зі зростанням осмотичного тиску на мембрані. Осмотичний тиск залежить від типу і концентрації солей або органічних речовин у вихідному розчині, що в свою чергу впливає на рушійну силу процесу. Високі концентрації солі можуть сприяти утворенню забруднення на поверхні мембрани, про що також повідомлялось у [32].

## Висновки

У даному дослідженні застосовано модель «розчин-дифузія» для оцінки впливу основних робочих параметрів на ефективність зворотньоосмотичних мембран. Загальні результати показують, що вплив на проникність і затримання розчинених речовин є результатом взаємодії кількох факторів, зокрема температури подачі/експлуатації, яка впливає на пористість мембрани, концентрації вихідного розбавленого водного розчину, а також трансмембранного тиску, що сприяє ущільненню мембрани. Результати моделювання підтверджують, що зі збільшенням часу роботи вихідного розчину спостерігається зменшення потоку проникнення в різних умовах експлуатації. Збільшення робочого тиску призводить до зростання як потоку проникнення, так і ефективності затримки солей, досягаючи ефективності на рівні 94% при тиску 500 кПа. Температура вихідного розчину відіграє роль у зменшенні ефективності затримки солі, одночасно підвищуючи потік проникнення. Збільшення концентрації солі у вихідному розчині від 2% до 8% призводить до зменшення як ефективності затримки солі, так і потоку проникнення через мембрану.

## REFERENCES

1. Abdelkareem, M.A., El Haj Assad, M., Sayed, E.T., Soudan, B. (2018). Recent Progress in the Use of Renewable Energy Sources to Power Water Desalination Plants. *Desalination*, 435, 97–113. doi:10.1016/j.desal.2017.11.018
2. Ang, W.L.; Mohammad, A.W.; Hilal, N.; Leo, C.P. (2014). A Review on the Applicability of Integrated/Hybrid Membrane Processes in Water Treatment and Desalination Plants. *Desalination*, 363, 2–18. doi:10.1016/j.desal.2014.03.008
3. Qasim, M.; Badrelzaman, M.; Darwish, N.N.; Darwish, N.A.; Hilal, N. (2019). Reverse Osmosis Desalination: A State-of-the-Art Review. *Desalination*, 459, 59–104. doi:10.1016/j.desal.2019.02.008
4. Qasim, M.; Darwish, N.A.; Sarp, S.; Hilal, N. (2015). Water Desalination by Forward (Direct) Osmosis Phenomenon: A Comprehensive Review. *Desalination*, 374, 47–69, doi:10.1016/j.desal.2015.07.016
5. Prihasto, N.; Liu, Q.-F.; Kim, S.-H. (2008). Pre-Treatment Strategies for Seawater Desalination by Reverse Osmosis System. *Desalination*, 249, 308–316. doi:10.1016/j.desal.2008.09.010
6. Shenvi, S.S.; Isloor, A.M.; Ismail, A.F. (2014). A Review on RO Membrane Technology: Developments and Challenges. *Desalination*, 368, 10–26. doi:10.1016/j.desal.2014.12.042.
7. Xia, S.; Li, X.; Zhang, Q.; Xu, B.; Li, G. (2006). Ultrafiltration of Surface Water with Coagulation Pretreatment by Streaming Current Control. *Desalination*, 204, 351–358. doi:10.1016/j.desal.2006.03.544
8. Ali, A.; Tufa, R.A.; Macedonio, F.; Curcio, E.; Drioli, E. (2017). Membrane Technology in Renewable-Energy-Driven Desalination. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1–21. doi:10.1016/j.rser.2017.07.047
9. Youssef, P.G.; AL-Dadah, R.K.; Mahmoud, S.M. (2014). Comparative Analysis of Desalination Technologies. *Energy Procedia*, 61, 2604–2607. doi:10.1016/j.egypro.2014.12.258
10. Alkaisi, A.; Mossad, R.; Sharifian-Barforoush, A. (2017). A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia*, 110, 268–274. doi:10.1016/j.egypro.2017.03.138

11. Cay-Durgun, P.; Lind, M.L. (2018). Nanoporous Materials in Polymeric Membranes for Desalination. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 20, 19–27. doi:10.1016/j.coche.2018.01.001
12. Qasim, M.; Darwish, N.N.; Mhiyo, S.; Darwish, N.A.; Hilal, N. (2018). The Use of Ultrasound to Mitigate Membrane Fouling in Desalination and Water Treatment. *Desalination*, 443, 143–164. doi:10.1016/j.desal.2018.04.007
13. Warsinger, D.M.; Chakraborty, S.; Tow, E.W.; Plumlee, M.H.; Bellona, C.; Loutatidou, S.; Karimi, L.; Mikelonis, A.M.; Achilli, A.; Ghassemi, A.; et al. (2018). A Review of Polymeric Membranes and Processes for Potable Water Reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209–237. doi:10.1016/j.progpolymsci.2018.01.004
14. Wang, K.; Abdalla, A.A.; Khaleel, M.A.; Hilal, N.; Khraisheh, M.K. (2016). Mechanical Properties of Water Desalination and Wastewater Treatment Membranes. *Desalination*, 401, 190–205. doi:10.1016/j.desal.2016.06.032
15. Choi, J.-S.; Kim, J.-T. (2014). Modeling of Full-Scale Reverse Osmosis Desalination System: Influence of Operational Parameters. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 21, 261–268. doi:10.1016/j.jiec.2014.02.033
16. Altaee, A.; Zaragoza, G.; Van Tonningen, H.R. (2014). Comparison between Forward Osmosis-Reverse Osmosis and Reverse Osmosis Processes for Seawater Desalination. *Desalination*, 336, 50–57. doi:10.1016/j.desal.2014.01.002
17. Kravchenko, M.V.; Vasylenko, L.O. (2022). Investigation of the Main Properties of Reverse Osmosis Membranes and Their Influence on Changes in the Physico-Chemical Composition of Aqueous Solutions. *Environmental safety and natural resources*, 43, 43–55. doi:10.32347/2411-4049.2022.3.43-55
18. Park, H.B.; Kamcev, J.; Robeson, L.M.; Elimelech, M.; Freeman, B.D. (2017). Maximizing the Right Stuff: The Trade-off between Membrane Permeability and Selectivity. *Science*, 356, eaab0530. doi:10.1126/science.aab0530
19. Mai, Z.; Gui, S.; Fu, J.; Jiang, C.; Ortega, E.; Zhao, Y.; Tu, W.; Mickols, W.; Van Der Bruggen, B. (2019). Activity-Derived Model for Water and Salt Transport in Reverse Osmosis Membranes: A Combination of Film Theory and Electrolyte Theory. *Desalination*, 469, 114094. doi:10.1016/j.desal.2019.114094
20. Spiegler, K.S.; Kedem, O. (1966). Thermodynamics of Hyperfiltration (Reverse Osmosis): Criteria for Efficient Membranes. *Desalination*, 1, 311–326. doi:10.1016/S0011-9164(00)80018-1
21. Sarbolouki, M.N. (1977). Reverse Osmosis and Synthetic Membranes – Theory, Technology, Engineering. (S. Sourirajan, Ed.). National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
22. Sobana, S.; Panda, R.C. (2011). Review on Modelling and Control of Desalination System Using Reverse Osmosis. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 10, 139–150. doi:10.1007/s11157-011-9233-z
23. Merten, U. (1963). Flow Relationships in Reverse Osmosis. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 1963, 2, 229–232. doi:10.1021/i160007a013
24. Ismail, A.F.; Matsuura, T. (2017). Progress in Transport Theory and Characterization Method of Reverse Osmosis (RO) Membrane in Past Fifty Years. *Desalination*, 434, 2–11. doi:10.1016/j.desal.2017.09.028
25. Mickols, W.; Mai, Z.; Van Der Bruggen, B. (2020). Effect of Pressure and Temperature on Solvent Transport across Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes: An Activity-Derived Transport Model. *Desalination*, 501, 114905. doi:10.1016/j.desal.2020.114905
26. Paul, D. (2004). Reformulation of the Solution-Diffusion Theory of Reverse Osmosis. *Journal of Membrane Science*, 241, 371–386. doi:10.1016/j.memsci.2004.05.026
27. Kravchenko, M.; Bereznytska, Y.; Hunchenko, O.; Vasylenko, L.; Haba, K. (2021). The Theoretical Calculation of Activity Coefficients in the Use of Baromembrane Methods for Water Treatment. In Proceedings of the International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2021»; European Association of Geoscientists & Engineers: Lviv, Ukraine, 2021; (pp. 1–5).



28. Costa, M.L.; Dickson, J.M. (1991). Modelling of Modules and Systems in Reverse Osmosis. Part I: Theoretical System Design Model Development. *Desalination*, 80, 251–274. doi:10.1016/0011-9164(91)85162-N
29. Zhao, S.; Zou, L. (2011). Effects of Working Temperature on Separation Performance, Membrane Scaling and Cleaning in Forward Osmosis Desalination. *Desalination*, 278, 157–164. doi:10.1016/j.desal.2011.05.018
30. She, Q.; Jin, X.; Tang, C.Y. (2012). Osmotic Power Production from Salinity Gradient Resource by Pressure Retarded Osmosis: Effects of Operating Conditions and Reverse Solute Diffusion. *Journal of Membrane Science*, 401–402, 262–273. doi:10.1016/j.memsci.2012.02.014
31. Karimanzira, D.; Rauschenbach, T. (2021). Performance Prediction of a Reverse Osmosis Desalination System Using Machine Learning. *GEP*, 09, 46–61. doi:10.4236/gep.2021.97004
32. Shamel, M.M.; Chung, O.T. (n.d.). Drinking water from desalination of seawater: optimization of reverse osmosis system operating parameters, 1.

*Стаття надійшла до редакції 05.06.2024 і прийнята до друку після рецензування 13.09.2024*

*The article was received 05.06.2024 and was accepted after revision 13.09.2024*

### **Шумбар Костянтин**

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0201-2142> **e-mail:** k.w.shumbar@gmail.com

### **Щербак Андрій**

аспірант Київського національного університету будівництва і архітектури

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4594-6412> **e-mail:** andron.vr@gmail.com

### **Кравченко Марина Василівна**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0428-6440> **e-mail:** marina-diek@ukr.net

### **Василенко Леся Олексіївна**

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

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

**e-mail:** lesya.kiev@ukr.net

### **Березницька Юлія Олегівна**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7953-3974> **e-mail:** juli\_mmm@ukr.net

УДК 622.276

**Katerina Radlovska**, PhD, assistant professor of the department of ecology  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2640-4735> **e-mail:** [katolrad22@gmail.com](mailto:katolrad22@gmail.com) e-mail

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

## **AUTOMATED CONTROL SYSTEMS MICROCLIMATE FACILITIES, MONITORING AND AUDIT WITHIN OIL FIELDS INFLUENCE**

**Abstract.** *Purpose.* To achieve the main task of research it is necessary to achieve the following objectives: justify the scientific approach solving the problem of improving the quality of the monitoring and forecasting of microclimate for the performance of oilfield facilities; propose research methodology of microclimate, patterns of their formation and impact assessment microclimate on operational characteristics of the objects.

*Methods.* The given article deals with the method of analyzing the previous studies localized within oil objects in Western Ukraine.

*Findings.* The given international experience and analysis of previous studies proved algorithm for Environmental Studies, through monitoring and forecasting of microclimate parameters during execution of manufacturing operations, to improve the environmental safety of the environment within the oil fields of influence objects.

*Originality.* The main research was made by author personally using special computer programs.

*Practical implications.* It has been analyzed: 1) a brief description of climate zone placement of oil fields; 2) methods of previous studies evaluating microclimatic parameters.

**Keywords:** microclimate, automated control system, environment, oil fields, ecological monitoring.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.65-68>

### **Introduction**

Among the key issues relating to the environmental assessment of the environment within the oil industry facilities allocated to lack of techniques and methodologies for evaluating the likely impact of micro-climatic parameters.

One method of determining such kind of changes is the method of assessment for the background and regulatory indicators. When conducting research examined the following methods and techniques: a comparative analysis of the methods and means of measurement of microclimate; methods of formalization, modeling, estimation and forecasting; method of hazard analysis and critical control points; methods for determining the size and concentration of aerosol particles, temperature and humidity of the surrounding air; methods of mathematical and physical modeling, including the method of expert estimates.

Modern development of oilfield facilities and introduction of new technologies and industry installations require high reliability, speed and precision of the operation control of the technological environment – namely microclimate.

In this regard, research and creation of reliable and effective systems of control of microclimate is important for the oil and gas industry [1-5].

This makes the urgency of the task of developing and implementing advanced and effective control systems microclimatic parameters on the basis of a systematic

approach to the development of methodology, measurement and control of microclimate, and technological support functional apparatus forecasting changes of microclimate parameters over time, taking into account the nature of relationships and processes within the technology environment, which in turn will ensure the quality of the performance of oilfield facilities.

The analysis of scientific literature has identified a number of outstanding issues related to the common goal of providing high and stable indicators of the performance of oilfield facilities by the control of microclimate. The quality of the technological environment in particular ensured strict compliance of microclimate. For this purpose, we offer to analyze the literature on the influence of microclimate on the performance of oilfield facilities, the estimation methods and means of control and formation of microclimate.

To achieve this goal it is necessary to achieve the following objectives:

- justify the scientific approach solving the problem of improving the quality of the monitoring and forecasting of microclimate for the performance of oilfield facilities;
- propose research methodology of microclimate, patterns of their formation and impact assessment microclimate on operational characteristics of the objects;
- establish methods of analysis and prediction of microclimate on the basis of physical and mathematical relationships, algorithms and methods of research;
- develop an automated system for the control of microclimate within oil field functioning facilities.

### **The main part of the article**

Items oil fields in Western Ukraine are situated in the temperate zone; the climate is generally temperate continental.

The analysis of scientific literature has identified a number of outstanding issues related to the common goal of providing high and stable indicators of the performance of oilfield facilities by the control of microclimate. The quality of the technological environment in particular ensured strict compliance of microclimate within the specified class. For this purpose, we offer to analyze the literature on the influence of microclimate on operational characteristics of the objects, the estimation methods and means of control and formation of microclimate.

The measurement of microclimate and analysis of the results is made according to the international standard ISO 14644, the law of labor protection and sanitary norms [1, 2].

Dimensions of aerosol particles and their concentration in the indoor air oilfield objects (for example Bogorodchany production line) are measured only for the size of the particles that set technical requirements assembly process. Measurements can be made by proposed method for automated continuous air sampling. To finish the measurement results proposed to use a graphical method of sequential sampling [5].

To predict the state of microclimate asked to use the methods of interpolation and extrapolation function using cubic splines.

Calculation of the parametric reliability of the system is based on parametric methods for determination of the reliability of the circuit control system.

To assess the influence of microclimate encouraged to use the method of expert estimates. For evaluation of group average value estimates for each object:

$$x_i = \sum_{h=1}^l \sum_{j=1}^m q_h x_{ij}^h k_j (i = 1, 2, \dots, n). \quad (1)$$

where  $m$  – the number of experts that perform evaluation  $n$  objects  $l$  on indicators; evaluation results are presented as a rank  $x_{ij}^h$ ;  $j$  – number of experts;  $i$  – number of the object;  $h$  – index number (signs) comparison;  $q_h$  – weight ratio performance comparison sites;  $k_j$  – expert competence factor.

Odds competence of experts evaluated the degree of consistency with group assessment objects:

$$k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^n x_{ij} x_i^t; \quad \sum_{j=1}^m k_j^i = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, m). \quad (2)$$

The method enables peer reviews to evaluate that performance in the process of preparation, depending on the room temperature, and assess the degree of dependence.

Using risk analysis and critical control points HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) allows you to perform a comprehensive assessment process to identify the factors that are the most dangerous for the performance of objects and technological operations. However, an analysis of hazards and selected those that eliminate or reduce the negative impact which significantly affects the functioning of the study.

## Conclusion

So, given the international experience and analysis of previous studies proved algorithm for Environmental Studies, through monitoring and forecasting of microclimate parameters during execution of manufacturing operations, to improve the environmental safety of the environment within the oil fields of influence objects.

## REFERENCES

1. Zakon Ukraine "Ohorona prazi". (2002). Kyiv.
2. Sanitarny normu microclimaty na promuslovuh obektah SDS: 3.3.6.042 – 99: № 42 vid 1.12.99.
3. Handzyuk, M. (2004). Prunzypu ohorony prazy: Pidruchnyk. (M.P. Handzyuk, Ed.). Kyiv: Caravel.
4. Adamenko, O. (2004). Geografichna informazina systema vuznachanja ecologicchnoy situaziy v meshah administrativnykh rajoniv na pruklady Zahidnogo region. Geografia navkolushnogo seredovusha: istoryja, teoriya, metody, practuka. Ternopil.
5. Radlovska, K. (2012). Geochemichny analiz gruntiv Rogatunskogo rayony Ivano-Frankivscja oblast. *Ecologicchna bezbeka ta zbalansovana resursokorustuvanja*, 1 (7), 48-53.

*The article was received 02.05.2024 and was accepted after revision 21.08.2024*

**К.О. Радловська**

## **АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОБ'ЄКТІВ, МОНІТОРИНГУ І АУДИТУ В МЕЖАХ ВПЛИВУ НАФТОВИХ РОДОВИЩ**

**Анотація.** Для досягнення основної мети дослідження необхідно вирішити наступні завдання: обґрунтувати науковий підхід, що вирішує проблему вдосконалення процедур моніторингу нафтопромислових об'єктів; запропонувати методологію дослідження мікроклімату.

Дана стаття присвячена аналізу попередніх досліджень, проведених в межах впливу нафтових родовищ в Західній Україні.

Міжнародний досвід і аналіз попередніх досліджень довели перевагу алгоритму екологічних досліджень за допомогою моніторингу та прогнозування параметрів мікроклімату під час виконання технологічних операцій, спрямованих на поліпшення екологічної безпеки навколишнього середовища в межах впливу нафтових родовищ.

Основне дослідження було зроблено автором особисто за допомогою спеціальних комп'ютерних програм.

Було проаналізовано: 1) короткий опис кліматичної зони в межах розміщення нафтових родовищ; 2) методи попередніх досліджень, що оцінюють мікрокліматичні параметри.

**Ключові слова:** мікроклімат, автоматизована система управління, охорона навколишнього середовища, нафтові родовища, екологічний моніторинг.

*Стаття надійшла до редакції 02.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 21.08.2024*

**Радловська Катерина Олексіївна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу

**Адреса робоча:** 76019 Україна, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-2640-4735> **e-mail:** [katolrad22@gmail.com](mailto:katolrad22@gmail.com)

UDC 504.4(477.86)

**Ihor Petrushka**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Environmental Safety and Environmental Protection of the Lviv Polytechnic National University

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3344-4196> **e-mail:** [ihor.m.petrushka@lpnu.ua](mailto:ihor.m.petrushka@lpnu.ua)

**Nataliia Latsyk**, PhD student of the Lviv Polytechnic National University

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7539-2799> **e-mail:** [nataliia.v.latsyk@lpnu.ua](mailto:nataliia.v.latsyk@lpnu.ua)

**Kateryna Petrushka**, PhD, Associate Professor of the Department of Ecology and Balanced Nature Management of the Lviv Polytechnic National University

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-759X> **e-mail:** [kateryna.i.petrushka@lpnu.ua](mailto:kateryna.i.petrushka@lpnu.ua)

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

## MODELING OF FINE DUST DISTRIBUTION IN ATMOSPHERIC AIR WITHIN RESIDENTIAL BUILDINGS

**Abstract.** Sustainable development of the country includes a balance between economic growth, social welfare and environmental safety. This means managing all aspects of life so as to ensure the well-being of people and not harm the environment. This is important so that future generations can live in safety. The quality of atmospheric air is of particular importance, as it has a direct impact on people's health. Cement industry is one of the first positions on the scale of emissions of harmful substances, including carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). In its structure, dust emissions from cement plants are considered mainly as aerodisperse systems. In these systems, the dispersed phase consists of solid particles (dust) or fine droplets, while the dispersed phase is a gas-air mixture. This gas-air mixture may contain a variety of contaminants, both organic and inorganic. Predicting and regulating air quality in areas adjacent to cement plants can be achieved by modeling the spread of cement dust. This simulation allows to determine dust concentrations in the air at different distances from the source of emissions and helps to develop effective measures to reduce the man-made load on the environment.

Cement dust is one of the priority pollutants that must be considered when organizing air quality monitoring. Effective atmospheric monitoring of dust pollution of the air environment allows you to obtain up-to-date data on dust concentration, analyze trends of change and assess the impact on human health and the environment.

Reducing the technogenic impact of aerodisperse systems formed as a result of cement production is an important task to ensure environmental safety.

We conducted a detailed analysis of the literary data of this problem and developed a mathematical model for predicting the distribution of cement dust in residential buildings. Invention proposes improvement of dust-collecting equipment in cement production that allows to reduce emissions of cement dust into atmosphere by 10-15%.

**Keywords:** finely dispersed cement dust, neutralization, trapping, environmental safety, air quality monitoring.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.69-80>

## 1. Introduction

Atmospheric air is an important and dynamic environment of the biosphere, and its pollution can create prerequisites for reducing environmental safety in large areas. Fine dust pollutants of cement plants are especially dangerous because of their multicomponent composition and the ability to cause synergistic effects in the interaction of various pollutants.

The spread of pollutants along with air masses can disrupt the ecological balance of biogenic substances in all components of the ecosystem. This reduces the level of environmental safety of the biosphere and contributes to the degradation of ecosystem components.

The intensity and nature of the transport of pollutants make it possible to distinguish between zones of direct (main) and indirect effects. These zones differ in the intensity and scale of impact on the environment and humans, which must be taken into account when planning environmental measures.

Aerodisperse systems of cement plants have the ability to cause synergistic effects in the interaction of various pollutants [1-3].

The spread of pollutants along with air masses can disrupt the ecological balance of biogenic substances in all components of the ecosystem. The level of environmental safety in the biosphere is decreased and ecosystem components are degraded. In addition, the migration of pollutants affects not only the atmospheric air, but also other components of the environment, which extends the negative impact on the entire environmental safety system.

The rate of distribution of dust emissions in the atmosphere in residential areas depends on several factors, including the sources of emissions, meteorological conditions, topography and the presence of natural or artificial barriers. Among the main impact factors are: sources of emissions; wind load between buildings; precipitation (rain and snow can precipitate dust particles, reducing their concentration in the air); the level of temperature and humidity of the air (high temperature and low humidity contribute to the rise of dust into the air, while high humidity can contribute to the deposition of dust); terrain topography (flat areas are usually more vulnerable to the spread of dust emissions than hilly or mountainous areas where natural barriers can trap pollutants); natural and artificial barriers (green spaces).

Cement production is one of the main sources of dust emissions, which can significantly affect air quality in areas of residential buildings located near cement plants. The intensity of the distribution of dust emissions in the production of cement depends on several key factors: the technological process (extraction and transportation, grinding of raw materials); clinker kilns (dust is formed as a result of chemical reactions at high temperatures); grinding and mixing the clinker with other components.

Given the above, the question of the process of modeling the migration of fine particulate matter in atmospheric air remains relevant. It is necessary to take into account the main stages of modeling: determining the sources of emissions; identification of point (furnace, crusher), linear (transport belts) and planar (raw material storage) sources of dust emissions; determining characteristics of each source, such as emission height, emission rate and particle size distribution; collection of meteorological data; taking into account the terrain.

There are several models that can be used to simulate the spread of cement dust, such as AERMOD, CALPUFF, ADMS, HYSPLIT and others. The choice of model depends on the specifics of the task, the available data and the requirements for the accuracy of the simulation. The AERMOD model is developed by Canadian and American scientists.

This model is designed to predict continuous emissions from ground level and dispersion of intermittent emissions has several important characteristics that ensure its accuracy and flexibility: turbulent flows are linear, while the average and vertical wind speeds are zero; taking into account meteorological conditions at different altitudes, the model allows to predict the profiles of temperature, wind, turbulence of the environment, take into account the construction aspects, simulate the dry and wet method of precipitation of impurities [4-8].

To ensure environmental safety and public health in areas adjacent to cement plants, it is crucial to develop a mathematical model of cement dust distribution.

## 2. Results and Discussion

Research by leading scientists suggests that dust pollution of the lower atmosphere poses a significant threat to the environment and human health. Solid dust particles, depending on their characteristics, can have a variety of negative effects [10, 11, 12].

Fine dust has the greatest fibrogenic activity, its particles penetrate the deepest and are retained by the alveoli of the lungs, which causes a number of specific diseases, which necessitates measures to reduce the flow of pollutants into the air of settlements and predict the distribution of dust particles in atmospheric air [10-12, 20].

To develop a mathematical model of the fine dust propagation process, we use the differential diffusion transport equation, this equation describes how the concentration of dust particles changes with time and three-dimensional space [20]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} + \sigma^* C = \frac{\partial}{\partial z} y \frac{\partial C}{\partial z} + \mu^* \nabla^2 C + k, \quad (1)$$

where  $u, v, w$  are wind speed parameters along the Cartesian coordinate system axis, m/s;

$\mu^*$  – horizontal diffusion coefficient in the plane  $(x, 0, y)$ ,  $m^2/s$ ;

$y$  – vertical diffusion coefficient in  $z$ -direction,  $m^2/s$ .

The product of the Laplace operator for concentration is calculated from the following relationship:

$$\nabla^2 C = \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}, \quad (2)$$

$k$  – coordinate and time dependent source parameter,  $k = f(x, y, z, t)$ ;

$\sigma^*$  – value associated with substance transformation,  $s^{-1}$ .

The authors [13-15, 20] present that in order to solve this one-dimensional problem of modeling the propagation of fine dust in the atmosphere, equation 1 is considered in a simplified form, while taking into account that the transfer of solid particles in the atmosphere occurs under the condition  $-\infty < x < \infty$ , that is, in an infinite medium.



Using the data of meteorological conditions in relation to the characteristics of the wind load, as well as taking into account the stationary process of loading on the atmosphere, equation (1) takes the form:

$$u \frac{dC}{dx} + \sigma \cdot C = \mu \cdot \frac{d^2C}{dx^2} + Q \delta (x - x_0). \quad (3)$$

where  $Q$  – power of the source emitting dust into the atmosphere, kg/s;  
 $\delta (x - x_0)$  – Dirac delta function, which takes into account the integral content of dust particles that diffuse in the volume of air in height, as well as the number of particles settling on the surface of the earth,  $1/m^3$ .

When solving this equation, the following boundary conditions are taken into account that the limit of dust dispersion is a stationary source is the size of the sanitary protection zone (SPZ) of the enterprise; the source is in the center of coordinates; source emission power is a constant value [15-17].

The solution of equation (3) to obtain numerical data is possible using finite difference dependencies.

To do this, it is necessary to discretize the space of distribution of contamination of solid dust particles, taking into account the distance from the source to the boundary of the SPZ of the enterprise at certain intervals.

Space sampling is an important step in the numerical solution of differential equations, such as the diffusion transfer equation. One popular method for this is the finite difference method. This method consists in replacing differential operators with difference operators, which allows you to turn a differential equation into a system of algebraic equations. Consider the space sampling for the one-dimensional diffusion equation:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Suppose that we sample space in increments of  $\Delta x$  and time in increments of  $\Delta t$ . Denote the concentration at point  $x_i = i\Delta x$  and at time  $t_n = n\Delta t$  as  $C_i^n$ .

Then we can take advantage of spatial and temporal discretizing:

Differential equation (3) under the condition  $-x = x_i, (i = 1, 2, \dots, n-1)$  can be replaced by a linear equation:

$$\mu_i \frac{C_{i+2} - 2C_{i+1} + C_i}{h^2} + u_i \frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2h} + \sigma_i C_i = Q \delta(x - x_0). \quad (5)$$

Transforming equation (5) with respect to  $C_{i-1}$ ,  $u_i$  and  $C_i + 1$ , we obtain a relationship for calculating the concentration of fine dust:

$$\left(\frac{\mu_i}{h^2} - \frac{u_i}{4h}\right) \cdot C_{i-n} + \left(\frac{-4\mu_i}{h^2} + \frac{\delta}{(1-h)}\right) \cdot C_i + \left(\frac{\mu_i}{h^2} + \frac{u_i}{4h}\right) \cdot C_{i+n} = Q \cdot \delta(x - x_0). \quad (6)$$

To be able to predict the concentration of fine dust at a certain distance from the source of dispersion, it is necessary to take into account the wind speed and power of the source, and it is necessary to use the dispersion equation of dust inclusions in the atmosphere. Using this equation, you can determine the distribution of dust concentrations depending on the height and distance and the source of the emission, taking into account the wind speed.

Most domestic and foreign scientists use the Gauss scattering equation [18-19] to simulate the scattering of pollutants in the atmospheric environment. This equation takes into account parameters such as wind speed, emission source power, source height, and atmospheric turbulence.

For the selected object of research, the calculation of the degree of distribution of fine particles of cement production took into account the following data: the power of the emission source  $8.4 \times 10^{-3}$  kg/s; the average wind speed is 1.5 m/s, the distance from the source is 1000 m, the horizontal diffusion coefficient is taken accordingly [20] as for an aerosol –  $1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

The simulation results are shown in Fig. 1., indicate that the profile of change in dust concentrations from the emission source is uniform.

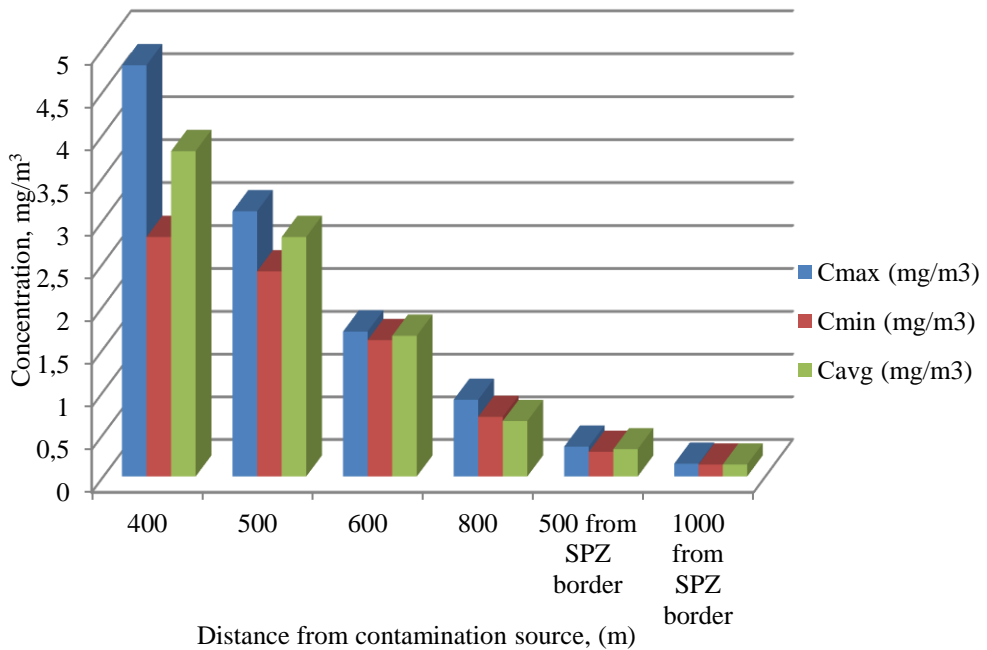


Fig. 1. Fine dust concentration distribution from emission source

Calculations and model (Fig. 1) together characterize the circular wind direction. The greatest amount of impurities falls at some distance from the emission source due to the transfer of air masses. This is due to the high inertia of fine dust, the particles of which are picked up and transported with the flow of wind. For a visual expression of the results of the obtained mathematical model, we built scattering maps of pollutants depending on the distance from the source which are shown in Figures 2 and 3.

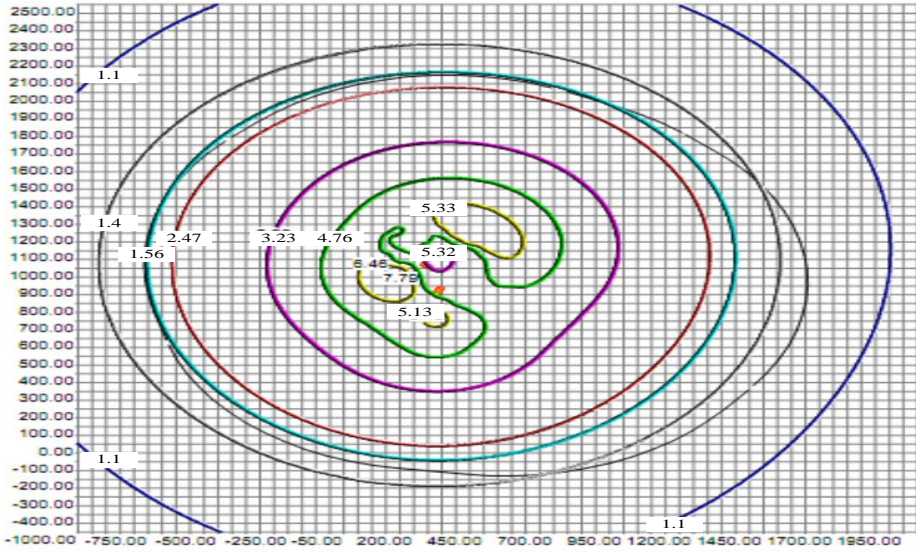


Fig. 2. Map of dispersion of cement dust in the atmosphere with the existing cleaning scheme

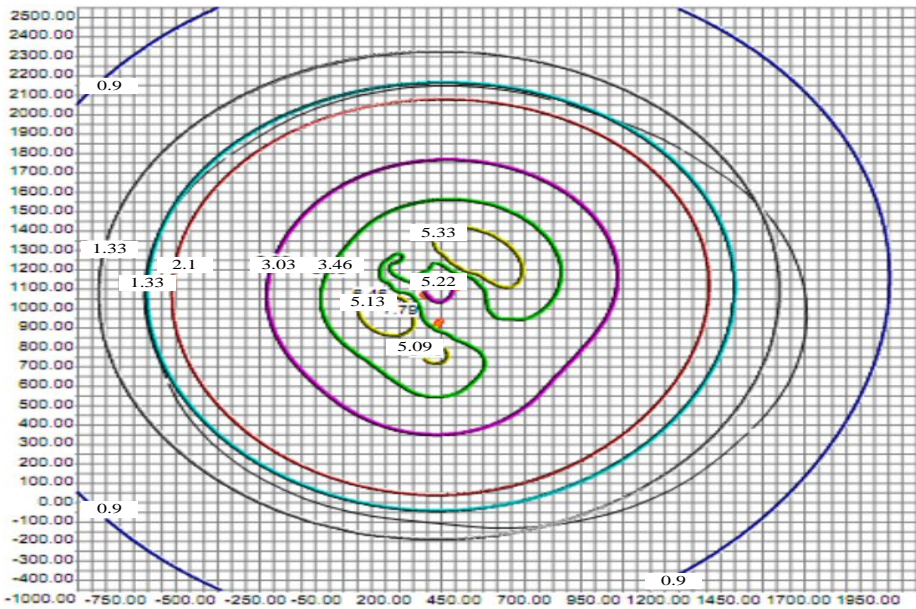


Fig. 3. Map of dispersion of cement dust in the atmosphere under the proposed scheme of air cleaning from cement dust

Experimental data on the degree of concentration of pollutants in the dispersion of cement dust according to the existing technological process are 10-15% higher according to the technological scheme proposed by us.

Based on the results of verification of the adequacy of the mathematical model of fine dust dispersion and experimental data, it was established that the deviation of the calculated values of the mathematical model from the experimental results does not exceed 20% over the entire studied range of distances (Fig. 4).

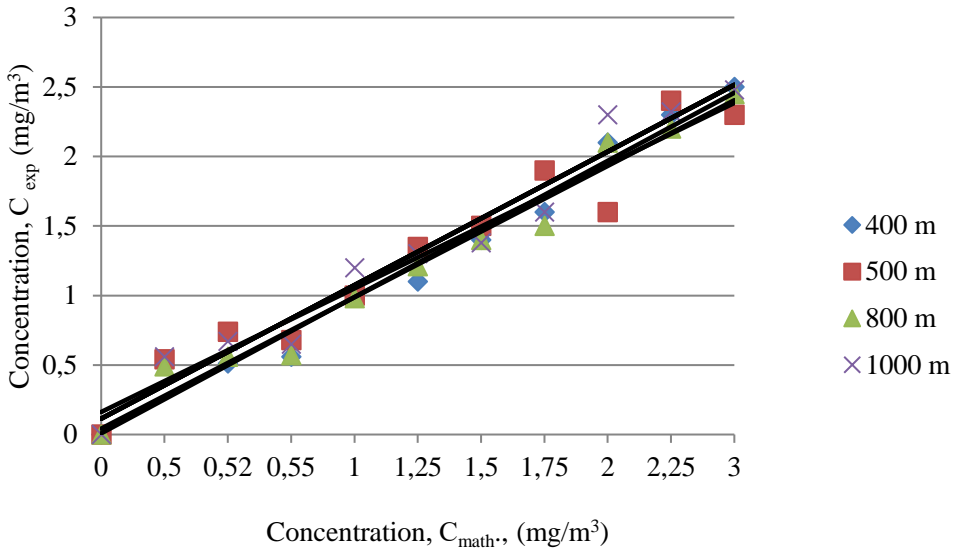


Fig. 4. Comparison of calculation results on dependence (6) and experimental data on concentration of cement dust in atmosphere

The Pearson correlation coefficient that characterizes a measure of covariance, one whose result is always within  $-1$  and  $1$ . It is a statistical measure that estimates the strength and path of the linear coupling of an equation with two variables. In relation to the obtained experimental and trend lines, the Pearson correlation coefficient ( $R_2$ ) is in the range of  $0.85-0.95$ .

The calculation of the proposed model, taking into account the boundary conditions, allows us to compare the 3D graphic distribution of cement dust in real conditions, depending on the distance from the source of pollution, provided that the proposed device is implemented to effectively clean the air from cement dust [18]. The solutions of critical equations and the construction of graphical dependencies are obtained using the Wolfram Alpha program in Figures 5-6 in the following sequence.

$$\text{Interpreting as: } \underset{\text{in } 12 \leq X \leq 20; 23 \leq Y \leq 58.}{\text{maximize}} (Y \times 158,24 \times 17,2 \times X) \times \frac{(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{(2,24 \times X^{0,94})} \tag{7}$$

Input interpretation:

$$\underset{\text{maximize}}{\text{function}} (Y \times 158,24 \times 17,2 \times X) \times \frac{(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{(2,24 \times X^{0,94})} \tag{8}$$

$$\text{domain } 12 \leq X \leq 20; 23 \leq Y \leq 58.$$

Global maximum:

$$\underset{\text{at } (X, Y) = (20, 58).}{\text{max}} \left\{ \frac{(Y \times 158,24 \times 17,2 \times X)(X^{0,754} \times Y^{0,15})}{2,24 \times X^{0,94}} \mid 12 \leq X \leq 20 \wedge 23 \leq Y \leq 58 \right\} = \frac{6737932912839621 \times 2^{389/500} \times 5^{407/500} \times 29^{3/20}}{47804853377} \tag{9}$$

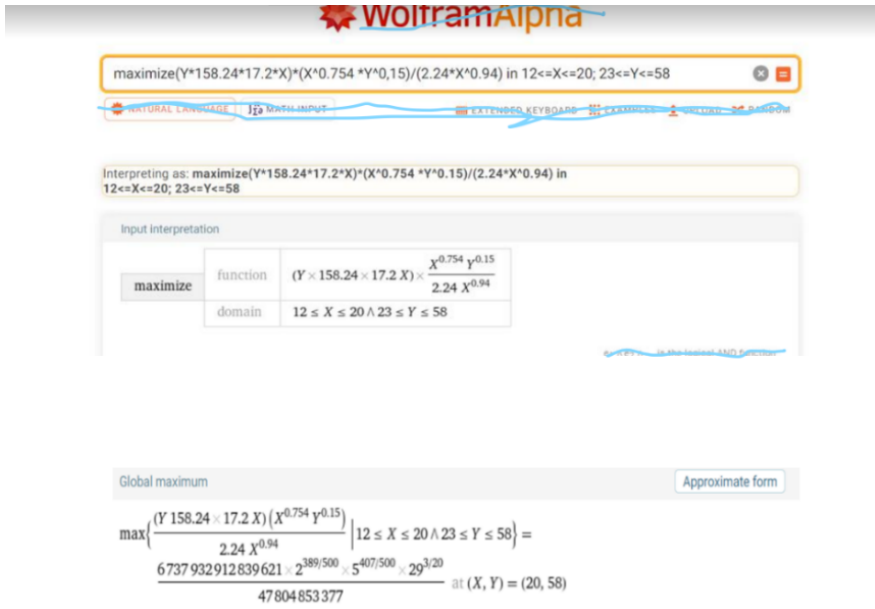


Fig. 5. Predicted criteria equations for the distribution of polluted air in real conditions when taking into account boundary conditions and the introduction of cleaning equipment according to the developed utility model patent

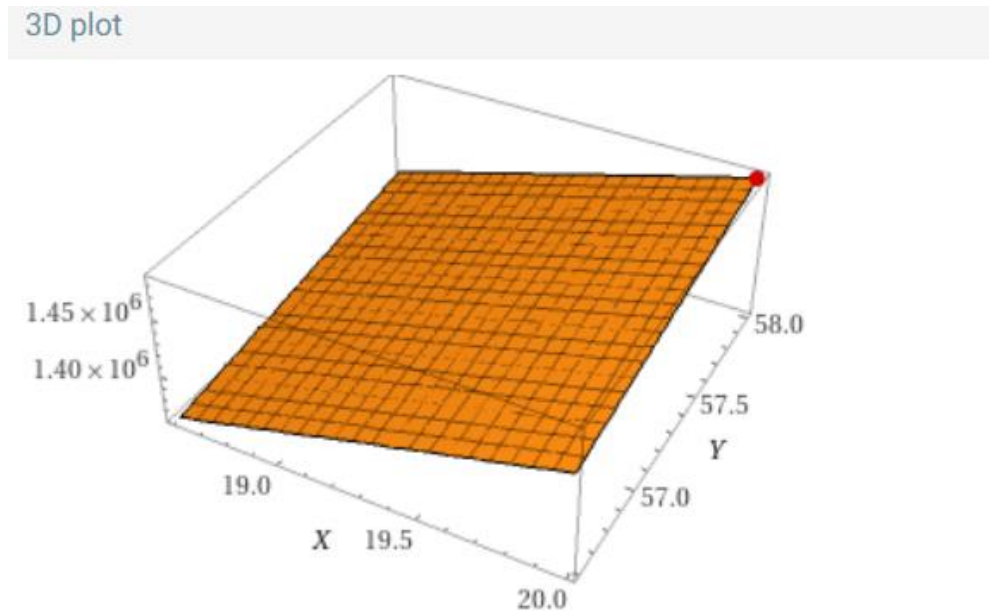


Fig. 6. 3D graph of the distribution of polluted air in real conditions, taking into account the boundary conditions and the introduction of cleaning equipment according to the developed utility model patent

Therefore, the proposed mathematical model of dispersion of solid particles with sufficient accuracy describes the process of dust propagation in atmospheric air.

### 3. Conclusion

The mathematical model of the transport of pollutants (DS) in the city takes into account both diffusion and turbulent transport mechanisms. The model also includes the interaction of air flow with elements of urban development, which significantly affects the distribution of pollution in height. The main aspects of the mathematical model are taken into account: diffusion transfer mechanism (distribution of pollutants due to molecular diffusion, taking into account the turbulence of air flows); interaction of air flow with urban development (the effect of a "street canyon," when high buildings limit horizontal and vertical air flows); dependence of the distribution of pollutants by height. Given the value of the Pearson correlation coefficient, which is in the range of 0.92-0.94, we can assert the adequacy of the mathematically obtained model that before the distribution of RR by the height of residential buildings, taking into account the wind speed and the ventilation coefficient, which depends on the structure of the building and its ability to provide natural circulation of air masses.

### REFERENCES

1. World Health Organization. (2020). Ambient air pollution: Health impacts. Retrieved from <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/ru/> (accessed 12 March 2020).
2. Turos, O.I., Petrosian, A.A., & Mykhina, L.I. (2011). Air hygiene: Experience and prospects of scientific support of problems of hygienic science and practice (pp. 133–149). Kyiv. (accessed 12 March 2020).
3. World Health Organization. (2013). Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP: technical report. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 302 p.
4. World Health Organization. (2006). Air quality guidelines – global update 2005. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe.
5. European Union. (2008). Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe. Official Journal of the European Union, Vol. 51, L 152, 44 p.
6. Janssen, N., & Mehta, S. (2006). Human exposure to air pollution. In Air quality guidelines for Europe (pp. 61-85). World Health Organization.
7. Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., et al. (2004). AERMOD: Description of Model Formulation, EPA-454/R-03-004. U.S. Environmental Protection Agency, 92 p. Retrieved from [https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf) (accessed 9 April 2020).
8. Horiachev, G., & Havryliuk, M. (2020). Modeling the spread of pollutants in the air using GIS technologies according to the OND-86 method. *Scientific works of Vinnitsa National Technical University*, 3, 1. Retrieved from <https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/157> (accessed 10 May 2020).
9. Cheliadyn, L.I. (2011). Scientific principles of resource-saving technologies and equipment to improve the environmental safety of industrial facilities in the Prykarpattia region: Doctoral dissertation. Ivano-Frankivsk, 340 p.
10. Bakharev, V.S. (2005). Environmental safety of the region under conditions of technogenic dust pollution of atmospheric air: Ph.D. thesis. Kremenchuk, 179 p.
11. Mokin, V.B., & Varchuk, I.V. (2013). Modeling the spread of pollutants in the air of a city using geoinformation technologies. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, (5), 13-18.
12. Pliatsuk, L.D., & Hurets, L.L. (2016). Improving air quality based on managing the environmental safety of an industrial enterprise. *Sciences of Europe*, 1(3), 62-66.

13. Bondar, A.G., & Statyukha, G.A. (1976). *Experimental design in chemical technology*. Kyiv: Vyshcha Shkola.
14. Alentum Software, Inc. (2009). *Advanced Grapher 2.2*. Retrieved from <http://www.alentum.com/agrapher/>
15. MVV No. 081/12-0161-05. (2005). *Industrial gas-dust emissions. Methodology for measuring the mass concentration of substances in the form of suspended solid particles in organized emissions from stationary sources by gravimetric method*. Kyiv.
16. Koziy, I.S., & Hurets, L.L. (2009). The use of wet dust collection devices in the production of titanium dioxide. In *Proceedings of the V International Jubilee Scientific and Practical Conference "Ecology. Economy. Energy Saving"* (Sumy, 14-16 May 2009) (p. 39).
17. Polutrenko, M.S., & Paranyak, N.M. (2015). Improving the efficiency of dust collection systems using developed modified devices. *Interuniversity collection "Scientific Notes"*, 52, 54-59. Lutsk.
18. Dust Collection System: Patent 155139 Ukraine: B01D 29/00, B01D 46/02. I.M. Petrushka, N.V. Latsyk, M.P. Kulyk. No u 2022 02724; applied on 24.08.2023; published on 24.01.2024; Bulletin No. 4. Retrieved from <https://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=349406&resId=1>
19. Serebryanskyi, D.O., Plashykhin, S.V., Beznosyk, Yu.O., & Nabok, O.M. (2014). Mathematical modeling of dust-laden gas flow cleaning in a cyclone dust collector. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(10(68)), 11–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23351>
20. Babkov, V.S., & Tkachenko, T.Yu. (2011). Analysis of mathematical models of pollutant dispersion from point sources. *Scientific Works of DonNTU*, 13(185), 147–155.

*The article was received 04.09.2024 and was accepted after revision 02.12.2024*

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Всесвітня організація охорони здоров'я. (2020). *Забруднення повітря: Вплив на здоров'я*. URL: <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/ru/> (дата звернення: 12.03.2020).
2. Турос, О.І., Петросян, А.А., Михіна, Л.І. (2011). Гігієна повітря: Досвід та перспективи наукового забезпечення проблем гігієнічної науки та практики. С. 133–149. Київ (дата звернення: 12.03.2020).
3. Всесвітня організація охорони здоров'я. (2013). *Огляд доказів щодо впливу забруднення повітря на здоров'я – REVIHAAP: технічний звіт*. Копенгаген: Європейське регіональне бюро ВООЗ, 302 с.
4. Всесвітня організація охорони здоров'я. (2006). *Настанови з якості повітря – глобальне оновлення 2005 року*. Копенгаген: Європейське регіональне бюро ВООЗ, 484 с.
5. Європейський Союз. (2008). *Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи*. Офіційний журнал Європейського Союзу, Т. 51, L 152, 44 с.
6. Янссен, Н., Мехта, С. (2006). Вплив забруднення повітря на людину. *Настанови з якості повітря для Європи* (С. 61–85). Всесвітня організація охорони здоров'я.
7. Чимореллі, А.Дж., Перрі, С.Г., Венкатрам, А., Вейл, Дж.С., Пейн, Р.Дж. та ін. (2004). *AERMOD: Опис формулювання моделі, EPA-454/R-03-004*. Агентство з охорони довкілля США, 92 с. URL: [https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod\\_mfd.pdf](https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf) (дата звернення: 9.04.2020).
8. Горячев, Г., Гаврилюк, М. (2020). *Моделювання розповсюдження забруднювачів у повітрі з використанням ГІС-технологій за методом ОНД-86*. Наукові праці Вінницького національного технічного університету, Т. 3, с. 1. URL: <https://trudy.vntu.edu.ua/index.php/trudy/article/view/157> (дата звернення: 10.05.2020).

9. Челябин, Л.І. (2011). Наукові принципи ресурсощадних технологій та обладнання для підвищення екологічної безпеки промислових об'єктів Прикарпаття: докторська дисертація. Івано-Франківськ, 340 с.
10. Бахарєв, В.С. (2005). Екологічна безпека регіону в умовах техногенного запиленого забруднення атмосферного повітря: кандидатська дисертація. Кременчук, 179 с.
11. Мокін, В.Б., Варчук, І.В. (2013). Моделювання розповсюдження забруднювачів в атмосфері міста з використанням геоінформаційних технологій. Вісник Вінницького політехнічного інституту, (5), 13–18.
12. Пляцук, Л.Д., Гурець, Л.Л. (2016). Підвищення якості повітря на основі управління екологічною безпекою промислового підприємства. Науки Європи, 1(3), 62–66.
13. Бондар, А.Г., Статюха, Г.А. (1976). Планування експериментів у хімічній технології. Київ: Вища школа, 184 с.
14. Alentum Software, Inc. (2009). Advanced Grapher 2.2. [Електронний ресурс]. Доступно: <http://www.alentum.com/agrapher/>.
15. МВВ № 081/12-0161-05. (2005). Промислові газопилові викиди. Методика вимірювання масової концентрації речовин у вигляді завислих твердих частинок в організованих викидах від стаціонарних джерел гравіметричним методом. Київ.
16. Козій, І.С., Гурець, Л.Л. (2009). Використання вологих пиловловлювачів у виробництві діоксиду титану. Матеріали V Міжнародної ювілейної науково-практичної конференції "Екологія. Економіка. Енергозбереження" (Суми, 14–16 травня 2009 р.) (С. 39).
17. Полутренко, М.С., Пареняк, Н.М. (2015). Підвищення ефективності систем пиловловлення за допомогою вдосконалених модифікованих пристроїв. Міжвузівський збірник "Наукові нотатки", 52, 54–59. Луцьк.
18. Система пиловловлення: Патент 155139 Україна: B01D 29/00, B01D 46/02 / І.М. Петрушка, Н.В. Лазик, М.П. Кулик. – № у 2022 02724; заявлено 24.08.2023; опубліковано 24.01.2024; Бюлетень № 4. <https://base.uipv.org/searchInvStat/showclaimdetails.php?IdClaim=349406&resId=1>.
19. Серебрянський, Д.О., Пляшикін, С.В., Безносик, Ю.О., Набок, О.М. (2014). Математичне моделювання очищення газопилового потоку в циклонному пиловловлювачі. Східно-Європейський журнал передових технологій, 2(10(68)), 11–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.23351>.
20. Бабков, В.С., Ткаченко, Т.Ю. (2011). Аналіз математичних моделей дисперсії забруднювачів від точкових джерел. Наукові праці ДонНТУ, 13(185), 147–155.

*Стаття надійшла до редакції 04.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 02.12.2024*

## **І.М. Петрушка, Н.В. Лазик, К.І. Петрушка** **МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛУ ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ** **В АТМОСФЕРНОМУ ПОВІТРІ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ**

**Анотація.** Сталий розвиток країни включає баланс між економічним зростанням, соціальним добробутом та екологічною безпекою. Це означає управління всіма аспектами життя, щоб забезпечити добробут людей і не завдати шкоди навколишньому середовищу. Це важливо для того, щоб майбутні покоління могли жити в безпеці. Особливо важливою є якість атмосферного повітря, оскільки вона безпосередньо впливає на здоров'я людей. Цементна промисловість займає одне з перших позицій стосовно масштабів викидів шкідливих речовин, включаючи вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>). За своєю структурою, викиди пилу з цементних заводів розглядаються, в основному, як аеродисперсні системи. У цих системах дисперсна фаза складається з твердих частинок (пилу) або дрібних крапель, тоді як дисперсна фаза являє собою газоповітряну суміш. Ця газоповітряна суміш може містити різноманітні забруднюючі компоненти, як органічного, так і неорганічного походження. Прогнозування та регулювання якості повітря в районах, прилеглих до



цементних заводів, може бути досягнуто шляхом моделювання поширення цементного пилу. Дане моделювання дозволяє визначити концентрацію пилу в повітрі на різних відстанях від джерела викидів і допомагає розробити ефективні заходи щодо зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище.

Цементний пил є одним з пріоритетних забруднювачів, який необхідно враховувати при організації моніторингу якості повітря. Ефективний атмосферний моніторинг пилового забруднення повітряного середовища дозволяє отримати актуальні дані про концентрацію пилу, аналізувати тенденції зміни та оцінювати вплив на здоров'я людей і навколишнє середовище.

Зменшення техногенного впливу аеродисперсних систем, що утворюються в результаті виробництва цементу, є важливим завданням для забезпечення екологічної безпеки довкілля.

Нами проведений детальний аналіз літературних даних даної проблеми і розроблена математична модель прогнозування розповсюдження цементного пилу в житлових забудовах. Запропоновано удосконалення пиловловлюючого обладнання при виробництві цементу, що дозволяє зменшити на 10-15% викиди цементного пилу в атмосферу.

**Ключові слова:** дрібнодисперсний цементний пил, нейтралізація, трепінг, екологічна безпека, моніторинг якості повітря.

#### **Петрушка Ігор Михайлович**

доктор технічних наук, професор, зав. кафедри екологічної безпеки та природоохоронної діяльності Національного університету «Львівська політехніка»

**Адреса робоча:** 79000, Україна, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3344-4196> **e-mail:** [ihor.m.petrushka@lpnu.ua](mailto:ihor.m.petrushka@lpnu.ua)

#### **Лацик Наталія Володимирівна**

аспірант Національного університету «Львівська політехніка»

**Адреса робоча:** 79000, Україна, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7539-2799> **e-mail:** [nataliia.v.latsyk@lpnu.ua](mailto:nataliia.v.latsyk@lpnu.ua)

#### **Петрушка Катерина Ігорівна**

кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та збалансованого природокористування Національного університету «Львівська політехніка»

**Адреса робоча:** 79000, Україна, м. Львів, вул. Степана Бандери, 12

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7905-759X> **e-mail:** [kateryna.i.petrushka@lpnu.ua](mailto:kateryna.i.petrushka@lpnu.ua)

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

UDC 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*: [mksmknart@gmail.com](mailto:mksmknart@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*: [iryinaklimova63@gmail.com](mailto:iryinaklimova63@gmail.com)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

### REDUCING THE LEVEL OF ACOUSTIC POLLUTION GENERATED BY ROAD TRANSPORT

***Annotation.** The current rate of construction and the level of technological development lead to a significant increase in the level of acoustic pollution in the urban environment. Usually, efforts to minimize the negative effects of noise on humans are limited to formal acoustic solutions at the design stage, but even more often – to the implementation of construction-acoustic solutions at the stage of an already implemented object. In pursuit of the desire to satisfy the buyer and obtain financial benefit, Ukrainian developers neglect project decisions and recommendations on noise and vibration protection issues and as a result, create problems not only for their customers, but also negatively affect the environment in general. The reasons for such a negative impact are: lack of acoustic solutions aimed at reducing noise and vibration from engineering equipment and its incorrect placement, incorrect placement of residential buildings in relation to already existing stationary sources of noise (motorways, railways, airports, existing industrial and production zones). Also, the reasons for the negative impact of noise on the environment include the lack of a global strategy for assessment, forecasting and development of methods of combating noise pollution. This strategy will make it possible to assess the general level of noise pollution in cities, the presence and number of "quiet zones" (territories with no excesses of permissible noise levels), and to create noise maps. The purpose of this work is an example of an acoustic approach, when at the stage of reconstruction of highway M 01, on the Kyiv-Chernihiv section, the necessity of applying acoustic solutions to reduce the noise load on the territory of residential buildings located in close proximity to the road was determined. The result of the work is an assessment of the presence of exceeding permissible noise levels and the development of constructive solutions to minimize acoustic pollution. The use of acoustic screens was chosen as a constructive solution. On-site acoustic measurements were carried out as a tool for assessing the exceedances of permissible noise levels in the residential area. The construction of a calculation model was chosen as a method for predicting the reduction of noise levels. The practical value of this work lies in the preliminary assessment of possible acoustic pollution at the design stage.*

***Key words:** noise level, sound pressure level, calculation model, shielding.*

А.В. Максименко, І.В. Клімова

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

## ЗНИЖЕННЯ РІВНЯ АКУСТИЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ, ЩО ГЕНЕРУЄТЬСЯ АВТОТРАНСПОРТОМ

***Анотація.** Сучасний темп забудови та рівень розвитку технологій призводять до суттєвого збільшення рівня акустичного забруднення в урбанізованому середовищі. Зазвичай, зусилля щодо мінімізації негативних наслідків впливу шуму на людину обмежуються формальними акустичними рішеннями на етапі проектування, але ще частіше – впровадженням будівельно-акустичних рішень, на етапі вже реалізованого об'єкта. В погоні за бажанням задовільнити покупця і отримати фінансову вигоду українські забудовники нехтують проектними рішеннями та рекомендаціями з питань захисту від шуму та вібрацій і, як результат, створюють проблеми не тільки своїм клієнтам, а і загалом негативно впливають на навколишнє середовище. Причинами такого негативного впливу виступають: відсутність акустичних рішень, направлених на зниження шуму та вібрацій від інженерного обладнання, його некоректне розміщення, некоректне розміщення житлових будівель по відношенню до вже існуючих стаціонарних джерел шуму (автомобільні дороги, залізниці, аеропорти, наявні промислово-виробничі зони). Також, до причин негативного впливу шуму на довкілля можна віднести відсутність глобальної стратегії з оцінки, прогнозування та розробки методів боротьби з акустичним забрудненням. Дана стратегія дозволить оцінювати загальний рівень шумового забруднення в містах, наявність та кількість «тихих зон» (території з відсутніми перевищеннями допустимих рівнів шуму), створювати шумові карти. Метою даної роботи є приклад акустичного підходу, коли на етапі реконструкції автошляху М 01, на ділянці Київ-Чернігів, визначалась необхідність застосування акустичних рішень зі зменшення шумового навантаження на територію житлових будинків, які розташовані в безпосередній близькості до дороги. Результатом роботи є оцінка наявності перевищень допустимих рівнів шуму і розробка конструктивних рішень щодо мінімізації акустичного забруднення. У якості конструктивних рішень було обрано використання акустичних екранів. У якості інструмента для оцінки перевищень допустимих рівнів шуму на прибудинковій території були проведені натурні акустичні вимірювання. Побудова розрахункової моделі була обрана в якості методу для прогнозування зниження рівнів шуму. Практична цінність даної роботи полягає в попередній оцінці імовірного акустичного забруднення на стадії проектування.*

***Ключові слова:** рівень шуму, рівень звукового тиску, розрахункова модель, екранування.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.81-91>

### Вступ

Швидкий розвиток урбанізації призводить до створення нових викликів у сфері екології та безпеки життєдіяльності. Однією з проблем, яку неможливо ігнорувати, є збільшення рівня акустичного забруднення в навколишньому середовищі.

Основними джерелами акустичного забруднення виступають: шум від роботи інженерного обладнання, технологічні процеси, автомобільні дороги, залізничні дороги, аеропорти, людський фактор (спортивні майданчики, гучні музичні клуби, стадіони тощо).

Згідно з результатами досліджень Всесвітньої Організації Охорони здоров'я [1], постійний вплив акустичного забруднення може призводити до розвитку фізіологічних та психологічних захворювань людини. До таких захворювань відносяться ішемічна хвороба серця, проблеми з метаболізмом в організмі [2], когнітивні порушення у дітей та проблеми зі сном. Згідно зі звітом про шум навколишнього середовища у Європі за 2020 рік [3], кількість людей, на яких негативно впливає шум від автомобільних доріг, складає 82 млн. А кількість людей, які знаходяться під впливом шуму від авіаційного транспорту, складає близько 3 млн людей у Європі [4].

Окрім негативного впливу на здоров'я людини, шумове навантаження у навколишньому середовищі відчутно впливає на нормальне існування тваринного та рослинного світів [5]. Наприклад, вплив шуму здатен підвищувати рівень гормонів (кортизолу) у риб, що призводить до погіршення репродуктивних функцій та підвищує рівень поглинання кисню [6].

В Україні оцінка наявності або відсутності високого рівня шумового навантаження (перевищення допустимих рівнів звукового тиску в нормованих зонах, які визначаються законодавством кожної країни) проводиться шляхом розрахунків на стадії проектування або методом інструментального вимірювання, для зон та об'єктів, які вже введені в експлуатацію.

У разі наявності перевищень допустимих рівнів звукового тиску, проблему зниження рівня шумового забруднення можна вирішувати на різних етапах проектування та з використанням різних методів та рішень. До таких методів та рішень можна віднести містобудівні, архітектурні, об'ємно-планувальні, конструктивні та технічні рішення, адміністративно-організаційні рішення для зон та об'єктів, що проектуються. У випадку об'єктів, які вже експлуатуються, необхідно впроваджувати комплекс будівельно-акустичних рішень для джерел акустичного забруднення і для зон та об'єктів, які необхідно захистити від шуму [7].

В Україні проблема шумового забруднення враховується на етапі проектування, але в більшості випадків ці рішення не враховуються на етапі реалізації. Тому дуже часто впроваджується комплекс будівельно-акустичних рішень для наявних об'єктів та зон. Такий підхід не є ефективним (оскільки додаткові будівельно-акустичні рішення не можуть в повній мірі вирішити проблему шумового забруднення, якщо ці питання ігнорувались на етапі проектування) і є економічно не вигідним.

Більш ефективним підходом в оцінці акустичного забруднення (наявного чи прогнозованого) є впровадження глобальних нормативних документів, директив, програм у питаннях прогнозування та оцінки шумового забруднення. В Європейському Союзі таким документом є Сьома Екологічна Програма Дій (7th EAP), яка направлена на вирішення проблем екології в Європі [8]. Окремим акустичним документом є Директива щодо шуму в навколишньому середовищі (END).

Ця Директива займається такими питаннями [9]:

- визначення впливу шуму навколишнього середовища та оцінка його впливу на здоров'я людини на рівні окремого помешкання;
- забезпечення доступу громадськості до інформації про рівень шуму навколишнього середовища та його вплив;
- запобігання та зменшення шуму навколишнього середовища;
- збереження низького рівня шуму навколишнього середовища в районах, де він не є високим;
- збереження «тихих зон» [10].

У свою чергу, в Сполучених Штатах Америки існує акт про контроль шуму 1972 року [11], основними задачами якого є:

- Зменшення рівня шуму. Закон мав на меті зменшити рівень шуму від різних джерел, таких як транспортні засоби, промислові установки, побутова техніка;
- Захист здоров'я та добробуту. Мета закону полягала в захисті здоров'я та добробуту громадян від шкідливих наслідків шумового забруднення;
- Створення стандартів. Закон передбачав розробку федеральних стандартів для різних джерел шуму, щоб забезпечити єдиний підхід до його регулювання.

Основною метою даної статті є аналіз результатів натурних вимірювань шуму від автотранспорту у населеному пункті Київської області, побудова розрахункової моделі на базі результатів вимірювань, оцінка рівня шуму на прибудинковій території, розробка заходів зі зниження шумового навантаження.

## Основна частина

З метою виключення впливу інших джерел шуму (інженерне обладнання, людський фактор) вимірювання проводились на трасі Київ-Чернігів в денний час. Точки вимірювань обиралися у населеному пункті Семиполки, Київської області з однієї сторони автодороги на різних відстанях від траси, термін проведення вимірювань  $\Delta t = 15$  хвилин. Результати представлені в таблиці 1.



Рисунок 1. Маркування точок вимірювань у н.п. Семиполки

Таблиця 1. Результати вимірювань

Точки вимірювань	Рівні звукового тиску $L$ (еквівалентні рівні звукового тиску $L_{екв}$ ) в дБ у октавних смугах частот із середньгеометричними частотами в Гц								Еквівалентні рівні звуку $L_A$ екр, дБА	Максимальні рівні звуку $L_A$ макс, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1	76	71	71	72	73	66	58	50	76	86
2	73	67	65	63	62	57	49	41	66	75
3	77	70	67	66	67	62	54	45	70	80

Шум від автотранспорту містить в собі декілька джерел [10], які відрізняються за характером спектру шуму (широкосмуговий і тональний), а саме:

- Шум двигуна;
- Шум від контакту покришок з покриттям (в залежності від типу покриття він може бути різним);
- Аеродинамічний шум авто;
- Шум деталей корпусу автотранспорту.

Результати натурних вимірювань дозволяють побудувати максимально наближену до реальних умов розрахункову модель, оскільки у вимірюваннях враховані всі джерела, описані вище.

Побудова розрахункової моделі дозволяє визначити прогнозовані рівні шуму у будь яких точках і в усіх октавних смугах частот моделі. Це допомагає оцінити, чи будуть перевищення рівня шуму в нормованих зонах, таких як прибудинкова територія. Розрахунок проводився для денного часу, оскільки вимірювання проводились у денний час.

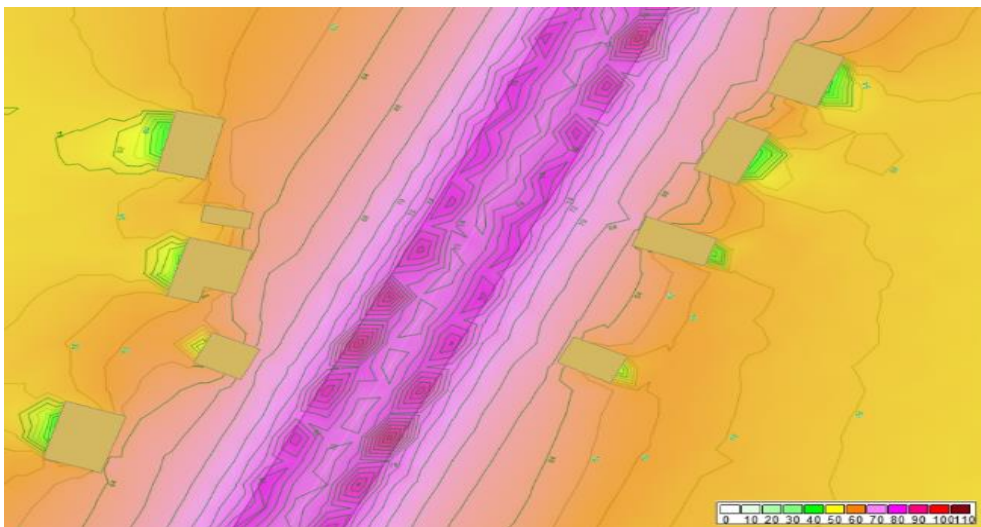


Рисунок 2. Рівні еквівалентного звукового тиску для денного часу  $L_{Аекв}$ , дБА, відмітка +1,500 в н.п. Семіполки

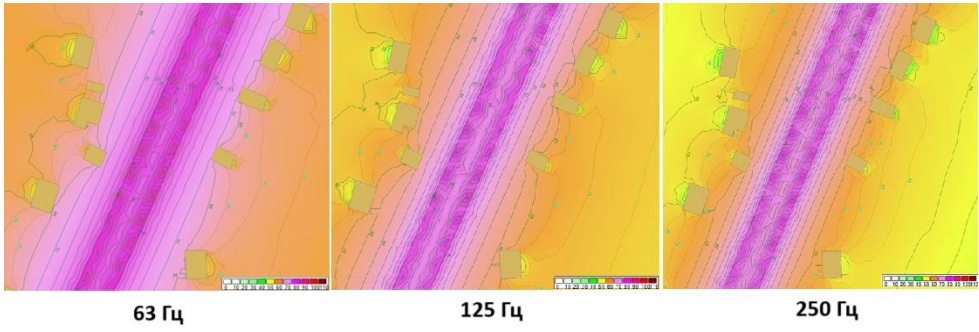


Рисунок 3. Рівні звукового тиску в октавному діапазоні для денного часу, дБ, відмітка +1,500 в н.п. Семіполки, частоти 63, 125, 250 Гц

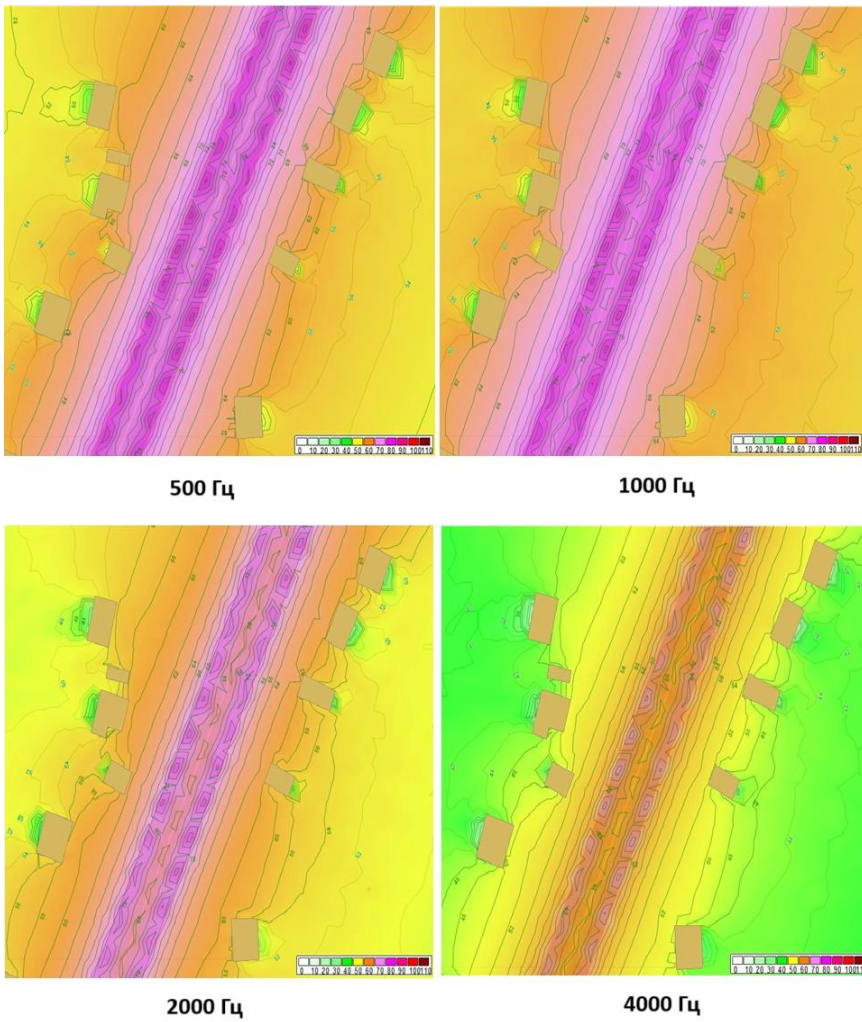


Рисунок 4. Рівні звукового тиску в октавному діапазоні для денного часу, дБ, відмітка +1,500 в н.п. Семіполки, частоти 500, 1000, 2000, 4000 Гц

Таблиця 2. Результати моделювання і порівняння з допустимими значеннями рівня шуму

Точки вимірювань	Рівні звукового тиску $L$ (еквівалентні рівні звукового тиску $L_{екв}$ ) в дБ у октавних смугах частот із середньгеометричними частотами в Гц								Еквівалентні рівні звуку $L_{Аекв}$ , дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Допустимий рівень шуму, день 8:00 – 22:00	77	70	64	59	56	54	53	52	65
2(фасад будівлі)	73	67	65	63	62	57	49	41	66
3(фасад будівлі)	77	70	67	66	67	62	54	45	70
Перевищення для точки 2	-	-	1	4	6	3	-	-	1
Перевищення для точки 3	-	-	3	7	11	8	1	-	5

Еквівалентний рівень шуму на фасаді найближчої будівлі від дороги складає 66 дБА. Допустимий еквівалентний рівень звуку  $L_{Аекв}$ , дБА на прибудинковій території для денного часу має бути  $\leq 65$ , а для нічного часу  $\leq 55$  [13] (з урахуванням поправки на район житлової забудови, яка склалась). В октавному діапазоні частот перевищення присутні в діапазоні 250-4000 Гц. Тому необхідно змоделювати заходи зі зменшення рівня шуму на прибудинковій території.

Оптимальним рішенням буде розміщення акустичного екрану максимально близько до джерела шуму [14]. Висота екрану становить 3 метри, товщина 104 мм.

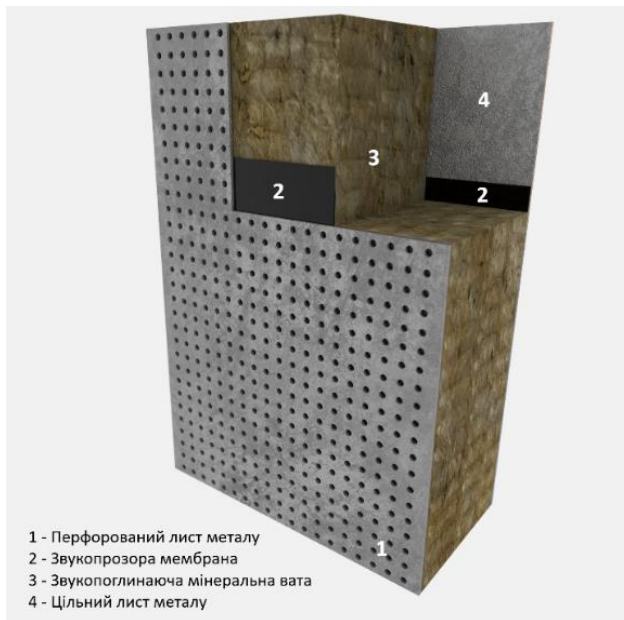


Рисунок 5. Конструкція звукопоглинаючого екрану



Акустичні характеристики екрану були задані згідно з такою конфігурацією [15]:

- Перфорований лист металу зі сторони джерела шуму, товщина 2 мм;
- Звукопрозора мембрана;
- Звукопоглинаюча мінеральна вата, з середнім коефіцієнтом звукопоглинання  $\alpha_w$  0,95-1, товщина 100 мм;
- Цільний лист металу, товщина 2 мм.

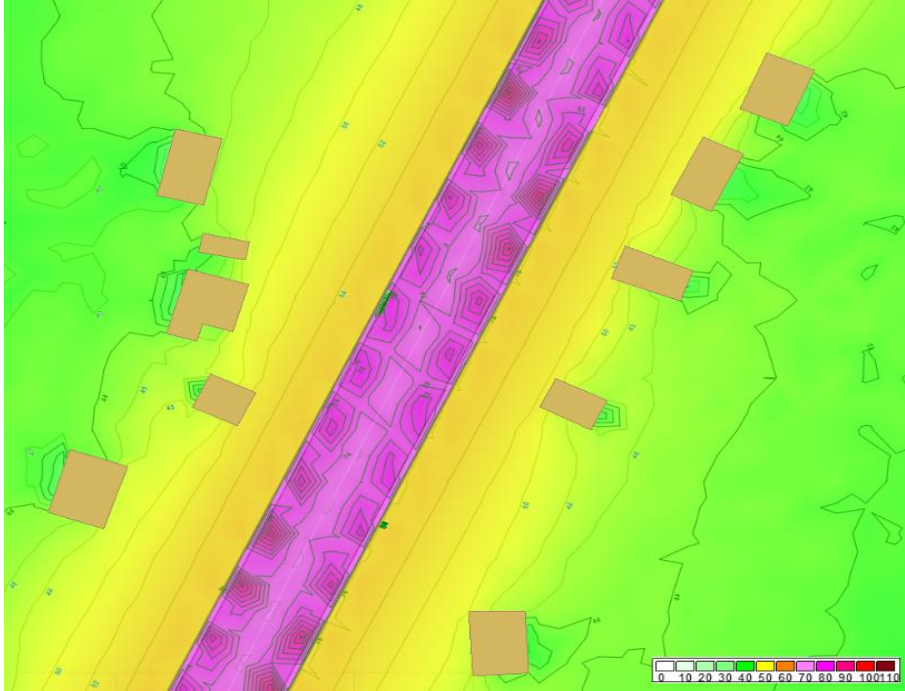


Рисунок 6. Рівні еквівалентного звукового тиску для денного часу  $L_{A,eq}$ , дБА, відмітка +1,500 в н.п. Семіполки, екран 3 м

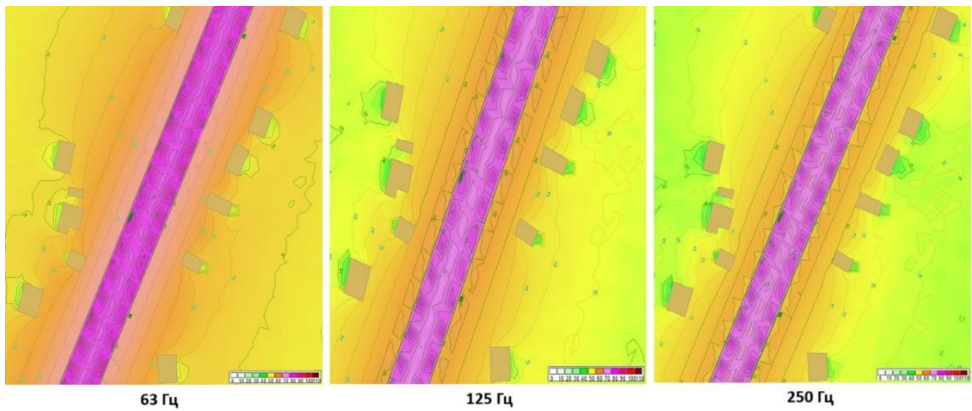


Рисунок 7. Рівні звукового тиску в октавному діапазоні для денного часу, дБ, відмітка +1,500 в н.п. Семіполки, частоти 63, 125, 250 Гц, екран висотою 3 м

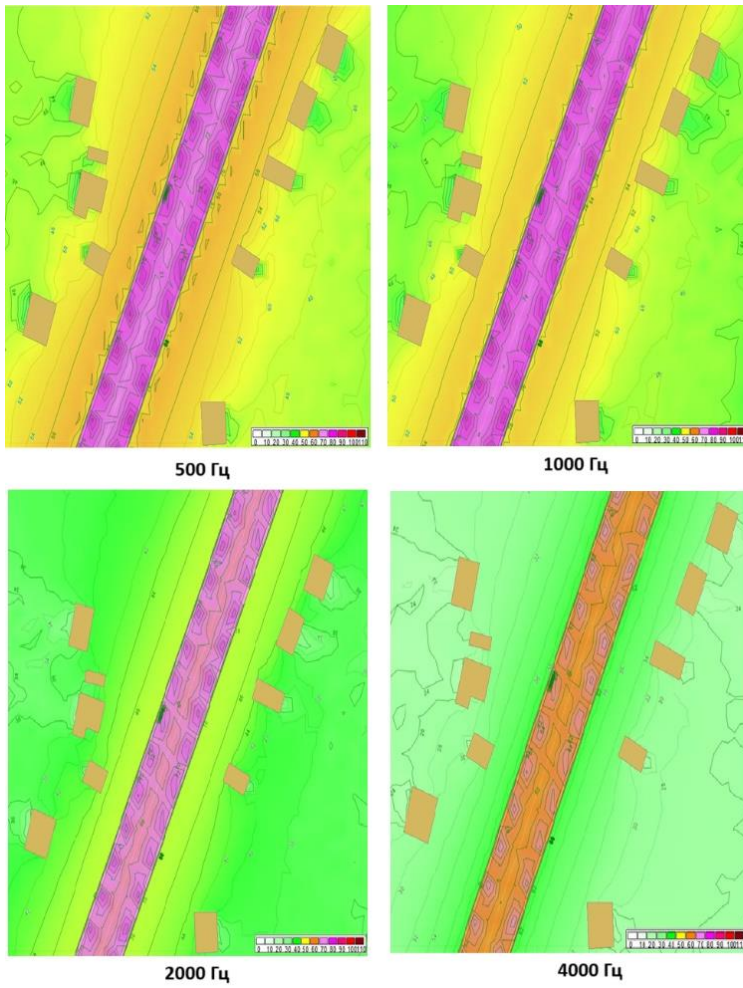


Рисунок 8. Рівні звукового тиску в октавному діапазоні для денного часу, дБ, відмітка +1,500 в н.п. Семіполки, частоти 500, 1000, 2000, 4000 Гц, екран висотою 3 м

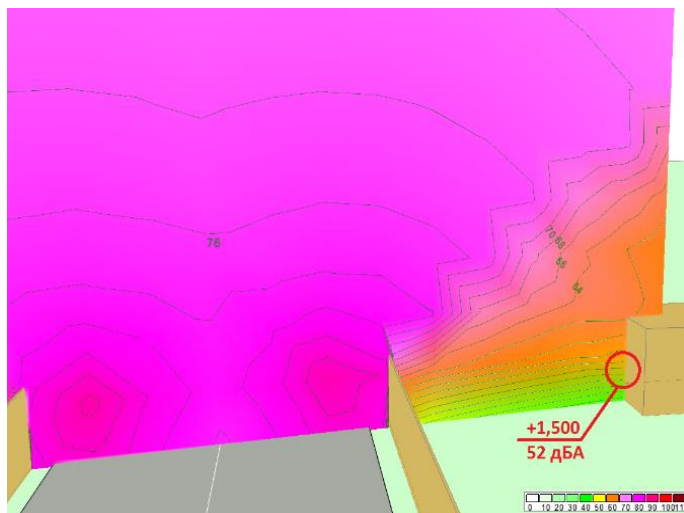


Рисунок 9. Поперечний переріз карти шуму для екрану висотою 3 м

Таблиця 3. Результати моделювання з урахуванням екранів висотою 3 м

Точки вимірювань	Рівні звукового тиску $L$ (еквівалентні рівні звукового тиску $L_{eq}$ ) в дБ у октавних смугах частот із середньгеометричними частотами в Гц								Еквівалентні рівні звуку $L_{A,eq}$ , дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Допустимий рівень шуму, день 8:00 – 22:00	77	70	64	59	56	54	53	52	65
1(7,5 м)	65	60	58	54	53	46	38	36	60
2(10 м)	62	58	56	52	49	41	32	29	57
3(20 м)	56	52	51	44	44	36	26	26	52
Прогнозоване зниження рівня шуму у точці 2 (фасад будівлі), для денного часу	11	9	9	11	13	16	17	12	9
Прогнозоване зниження рівня шуму у точці 3 (фасад будівлі), для денного часу	21	18	16	22	23	26	28	19	18

## Висновок

Отримані результати свідчать про високу ефективність зниження рівня шуму від автотранспорту методами екранування. Використання такої конструкції дозволяє знизити рівень звукового тиску на прибудинковій території на 9-18 дБА, що є оптимальним рішенням при розташуванні джерела шуму поблизу нормованих зон.

Побудова акустичної моделі дозволяє завчасно виявити перевищення допустимих значень рівня шуму, ще на стадії проєктування.

## REFERENCES

1. WHO. (2019). Environmental health inequalities in Europe. Second assessment report (2019), WHO Regional Office for Europe, Copenhagen. 30-34 p.
2. Biological mechanisms related to cardiovascular and metabolic effects by environmental noise (2018), WHO Regional Office for Europe, Copenhagen.
3. European Environment Agency. (2020). Environmental noise in Europe. Copenhagen, Denmark. 23-27 p.
4. EASA, et al. (2019). European aviation environmental report 2019. European Union Aviation Safety Agency, Cologne, Germany.
5. Francis, C. D. and Barber, J. R. (2013). A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(6), 305-313.
6. HELCOM. (2019). Noise sensitivity of animals in the Baltic Sea. Underwater noise. Baltic Sea Environment Proceedings 167. Baltic Marine Environment Protection Commission. 13-18 p.

7. DBN V.1.1-31:2013. Protection of territories, buildings and structures from noise. [Effective from 2014-01-06]. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine (In Ukrainian). [ДБН В.1.1-31:2013. Захист територій, будинків і споруд від шуму. [Чинний від 2014-01-06]. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України].
8. Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet'. OJ L 354/171; 28.12.2013.
9. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. OJ L 189, 18.7.2002.
10. EEA. (2016). Quiet areas in Europe – the environment unaffected by noise pollution, EEA Report No 14/2016, European Environment Agency. 80 p.
11. ACEA. (2017). Vehicles in use – Europe 2017. European Automobile Manufacturers' Association.
12. Public Law 92-574, Oct. 27, 1972. 17 p.
13. "On the approval of the State sanitary norms of permissible noise levels in the premises of residential and public buildings and on the territory of residential buildings." Order of the Ministry of Health of Ukraine No. 463 of February 22, 2019 (In Ukrainian). [«Про затвердження Державних санітарних норм допустимих рівнів шуму в приміщеннях житлових та громадських будинків і на території житлової забудови». Наказ МОЗ України N 463 від 22.02.2019].
14. DSTU-NB V.1.1-33:2013. Guidelines for calculation and design of noise protection of agricultural areas. [Effective from 2014-01-01]. Edition officer. Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine, 2014 (In Ukrainian). [ДСТУ-Н Б В.1.1-33:2013 Настанова з розрахунку та проектування захисту від шуму сельбищних територій. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014].
15. DSTU-NB V.1.1-32:2013. Guidelines for the design of noise protection in premises by means of sound absorption and shielding. [Effective from 2014-01-01]. Edition officer. Kyiv: Ministry of the Region of Ukraine, 2014 (In Ukrainian). [ДСТУ-Н Б В.1.1-32:2013 Настанова з проектування захисту від шуму в приміщеннях засобами звукопоглинання та скранування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014].

*Стаття надійшла до редакції 08.08.2024 і прийнята до друку після рецензування 25.11.2024*

*The article was received 08.08.2024 and was accepted after revision 25.11.2024*

**Максименко Артем Віталійович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-7880-8167> **e-mail:** [mksmknart@gmail.com](mailto:mksmknart@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. Повітряних сил України, 31, м. Київ, Україна, 03037

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

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

UDC 519.65

**Serhii Lupenko**<sup>1,2</sup>, Dr. Sc. (Tech), Professor

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6559-0721> **e-mail:** lupenko.san@gmail.com

**Oleksandr Volianyk**<sup>1</sup>, doctoral student

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9137-7580> **e-mail:** wonderage2018@gmail.com

<sup>1</sup>Institute of Telecommunications and Global Information Space, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>American University Kyiv, Kyiv, Ukraine

## IMPROVED ONTOLOGICAL MODEL OF THE KNOWLEDGE BASE OF THE EXPERT SYSTEM FOR DECISION SUPPORT IN THE FIELD OF DIGITAL PROCESSING AND COMPUTER SIMULATION OF CYCLIC SIGNALS

**Abstract.** *The work is devoted to the improvement of the conceptual and formal-logical model of the ontology of the subject area "Modeling and Processing of Cyclic Signals". Namely, the work developed a formal-logical model of the sub-ontology of tasks, a formal-logical model of the sub-ontology of problem-solving methods in the field of modeling and processing of cyclic signals, a formal-logical model of the sub-ontology of hardware and software tools, and a formal-logical model of the sub-ontology of the results of applying mathematical models, methods and means of processing and computer simulation of cyclic signals. The improved ontology model and its implemented prototype are the main knowledge base of the onto-oriented expert decision-making support system when solving the tasks of justified selection of mathematical models and methods for evaluating characteristics, spectral analysis and computer simulation of cyclic signals within the framework of the theory of cyclic functional relations. Examples of ontology fragments developed in the Protégé environment are given. The non-contradiction of the developed ontology was confirmed by means of Protégé's automated formal and logical reasoning. The expediency of API-based integration of the developed computer ontology with a large linguistic model, namely, with ChatGPT, is substantiated.*

**Keywords:** *modeling of ontologies, mathematical modeling, signal processing, cyclic signals, computer ontology, expert system.*

С.А. Лупенко<sup>1,2</sup>, О.В. Воляник<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>American University Kyiv, м. Київ, Україна

## УДОСКОНАЛЕНА ОНТОЛОГІЧНА МОДЕЛЬ БАЗИ ЗНАНЬ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В ГАЛУЗІ ЦИФРОВОГО ОПРАЦЮВАННЯ ТА КОМП'ЮТЕРНОЇ СИМУЛЯЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ

***Анотація.** Робота присвячена удосконаленню концептуальної та формально-логічної моделі онтології предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів». А саме, в роботі розроблено формально-логічну модель підонтології завдань, формально-логічну модель підонтології методів розв'язання завдань в галузі моделювання та опрацювання циклічних сигналів, формально-логічну модель підонтології програмно-апаратних засобів та формально-логічну модель підонтології результатів застосування математичних моделей, методів та засобів опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів. Удосконалена модель онтології та реалізований її прототип є основою бази знань онтоорієнтованої експертної системи підтримки прийняття рішень при вирішенні завдань обґрунтованого вибору математичних моделей та методів оцінювання характеристик, спектрального аналізу та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів в рамках теорії циклічних функціональних відношень. Наведено приклади фрагментів онтології, розробленої в середовищі Protégé. Засобами автоматизованого формально-логічного розмірковування Protégé підтверджено несуперечність розробленої онтології. Обґрунтовано доцільність інтеграції на основі API розробленої комп'ютерної онтології із великою лінгвістичною моделлю, а саме, із ChatGPT.*  
***Ключові слова:** моделювання онтологій, математичне моделювання, опрацювання сигналів, циклічні сигнали, комп'ютерна онтологія, експертна система.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.92-98>

### Вступ

Останні два десятиліття принесли значний прогрес у теорії та практиці побудови адекватних математичних моделей та ефективних моделебазованих ритмоадаптивних методів опрацювання циклічних сигналів на основі використання математичного апарату детермінованих та стохастичних циклічних функціональних відношень та їх перетворень [1-4]. Отримані результати суттєво доповнюють, поглиблюють та розширюють відомі напрацювання в рамках теорій періодично корельованих випадкових процесів [5-8], теорії періодично розподілених випадкових процесів [9], лінійних періодичних випадкових процесів та періодичних білих шумів [10], періодичних та періодично корельованих марковських процесів [11]. Однак, не дивлячись на суттєвий прогрес в галузі математичного моделювання та цифрових методів опрацювання сигналів циклічної просторово-часової структури, обґрунтування та вибір математичної моделі та відповідних моделебазованих методів опрацювання досліджуваних сигналів є непростою задачею, що потребує у дослідника глибоких математичних знань та практичного багаторічного досвіду роботи в цій галузі науки та інженерії.

## **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У цьому контексті, в роботах [12, 13] досліджуються питання розробки експертної онтоорієнтованої системи обґрунтованого вибору оптимальної (квазіоптимальної) моделі, методів та програмно-апаратних засобів цифрового опрацювання циклічних сигналів. Така система суттєво полегшить розробникам процес побудови моделєбазованої інформаційної технології опрацювання циклічних сигналів. Користувачами експертної системи (ЕС) можуть бути дослідники, інженери та інші фахівці, які мають потребу вирішувати завдання у галузі моделювання та опрацювання циклічних сигналів, але не обов'язково є експертами в цій області. Основним завданням ЕС є рекомендація оптимальних об'єктів для вирішення конкретних завдань користувача, таких як клас математичних моделей, конкретна модель та методи опрацювання і комп'ютерної імітації циклічних сигналів.

Як відомо, у розробці експертних систем головну роль відіграє створення її бази знань. Оскільки інженерія знань стрімко розвивається, особливо в галузі онтологічного моделювання [14-21], у роботах [12, 13] обґрунтовано використання комп'ютерної онтології як ядра бази знань експертної системи. Таке рішення, на основі онтоорієнтованих дерев рішень, дозволило специфікувати та автоматизувати логічні процеси, які лежать у теорії та практиці моделювання та опрацювання циклічних сигналів. Крім того, онтологічний підхід повністю узгоджений із стратегією аксіоматико-дедуктивного організування теорії, що забезпечує її структурованість та формалізованість, полегшуючи виявлення нових напрямів у цій галузі. Однак варто зауважити, що отриманих у роботах [12, 13] результатів недостатньо для побудови повноцінної бази знань експертної системи, оскільки розроблена концептуальна та формально-логічна моделі онтології не містять достатнього рівня деталізації опису знань в предметній області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів», зокрема, не містять формально-логічних моделей підонтологій типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, методів та програмних засобів їх розв'язання, а також моделей онтології результатів застосування цих методів та засобів.

## **Мета роботи**

Основною метою даної статті є удосконалення онтологічної моделі бази знань експертної системи підтримки прийняття рішень в галузі цифрового опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів, а саме, необхідно розробити концептуальні та формально-логічні моделі підонтологій типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, методів та програмних засобів їх розв'язання, а також моделей онтології результатів застосування цих методів та засобів.

**Об'єктом дослідження** є процес побудови формально-логічних моделей вказаних підонтологій предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів».

## Виклад основного матеріалу дослідження

Згідно із роботами [12, 13], семантичний простір предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів» у рамках теорії циклічних функціональних відношень є упорядкованою множиною п'яти змістовних підпросторів: підпростір математичних моделей сигналів, підпростір типових завдань моделювання та опрацювання циклічних сигналів, підпростір методів опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, підпростір програмно-апаратних засобів та підпростір результатів застосування цих знань у різних галузях. Згідно з аксіоматико-дедуктивною стратегією теорії циклічних функціональних відношень, логіко-семантичне ядро цього простору має містити термінологічно-понятійний апарат та систему тверджень, розподілену на аксіоматичну та вивідну групи. В залежності від рівня абстракції виокремлено метадисциплінарне ядро, абстрактне ядро та часткові змістовні області семантичного простору предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів». Виділення п'яти змістовних підобластей предметної області "Моделювання та опрацювання циклічних сигналів" вказує на необхідність розробки п'яти підонтологій для цієї предметної області, а саме, розробки підонтології  $O_1$  математичних моделей циклічних сигналів, підонтології  $O_2$  типових завдань опрацювання та моделювання цих сигналів, підонтології  $O_3$  методів опрацювання та комп'ютерного моделювання циклічних сигналів, підонтології  $O_4$  програмно-апаратних засобів опрацювання цих сигналів та підонтології  $O_5$  результатів застосування цих знань у різних галузях. Ці підонтології специфікують відповідні аспекти предметної області та упорядковують її семантичний простір.

У роботах [12, 13] побудовано формально-логічну модель комп'ютерної онтології математичних моделей сигналів циклічної просторово-часової структури, а саме, онтології  $O_1$ . У цій роботі побудуємо формально-логічну модель лише для підонтології  $O_2$  типових завдань опрацювання та моделювання цих сигналів, оскільки підонтології  $O_3$ ,  $O_4$  та  $O_5$  мають аналогічні структури. Друга онтологія  $O_2$  – це онтологія типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів. На формальному рівні вона задається такою реляційною системою:

$$O_2 = \{A_2 = B_2 \cup C_2, R_2 = \{AKO, IS - A\}, F_2 = \{f_2(\cdot)\}\}, \quad (1)$$

де  $A_2$  – скінченна множина термінів (понять), яка задає лексичний запас онтології  $O_2$ ;

$B_2$  – скінченна множина (назв) типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів;

$C_2$  – скінченна множина термінів, які розкривають зміст типових завдань (терміни-концепти, що означають (інтерпретують) типові завдання);

$F_2$  – одноелементна множина, яка містить функцію інтерпретації  $f_2(\cdot)$  типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, областю визначення якої є множина  $C_2$ , а областю значень є множина  $B_2$ . Функція інтерпретації  $f_2(\cdot)$  задає означення відповідних типових завдань опрацювання та комп'ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів із  $B_2$ , формуючи глосарій онтології  $O_2$ ;



$R_2$  – одноелементна множина, яка містить лише відношення родо-видового підпорядкування **АКО**, яке пов’язує між собою множину (клас) та підмножину (підклас) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, задаючи їх таксономію (ієрархію).

Згідно із концептуальною моделлю предметної області «Моделювання та опрацювання циклічних сигналів» скінченна множина (назв) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів  $B_2$  структурно та змістовно є залежною від множини  $B_1$  класів математичних моделей циклічних сигналів, а саме, кожному класу математичних моделей  $Mod_i \in B_1$  ставиться у відповідність множина  $B_{2,i}$ , яка є підмножиною множини  $B_2$  ( $B_{2,i} \subset B_2$ ), і яка, як свої елементи, включає всі типові задачі опрацювання та комп’ютерної імітації циклічних сигналів в рамках класу  $Mod_i$  математичних моделей.

Отже, всю множину типових завдань  $B_2$  можна подати таким чином:

$$B_2 = \cup_i B_{2,i}, B_{2,i} \cap B_{2,j} = \emptyset, \text{ при } i \neq j, B_{2,i} \neq \emptyset, B_{2,j} \neq \emptyset. \quad (2)$$

Тобто, всю множину типових завдань  $B_2$  можна розбити на взаємно неперетинні підмножини, кожна із яких, як свої елементи, містить лише ті типові завдання, які мають місце в рамках відповідного класу математичних моделей досліджуваних циклічних сигналів, а саме, існує таке розбиття  $D_{B_2} = \{B_{2,i}, i = \overline{1, I}\}$ . З іншої сторони, всю множину типових завдань  $B_2$  можна розбити на взаємно неперетинні підмножини, кожна із яких, як свої елементи, містить лише ті завдання, які стосуються одного класу однотипних завдань (класу однотипних завдань).

Однотипні завдання перебувають між собою у родо-видовому взаємозв’язку, який задається відношенням **АКО**, яке пов’язує між собою множину (клас) та підмножину (підклас) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів, задаючи їх таксономію (ієрархію). Ця таксономія є ізоморфною таксономії **Tax\_of\_Cf** між класами циклічних функціональних відношень.

Множину  $B_2$ , яка містить назви типових завдань, будемо позначати так:

$$B_2 = \text{Set\_Task} = \{Task_{\bar{I}\bar{J}}, \bar{I} \in N^n, \bar{J} \in N^n\}, \quad (3)$$

де  $Task_{\bar{I}\bar{J}}$  – позначення  $\bar{J}$ -го типового завдання опрацювання та комп’ютерної імітації циклічних сигналів у рамках  $\bar{I}$ -го класу математичних моделей циклічних сигналів.

Скінченна множина (назв) типових завдань опрацювання та комп’ютерної імітації (генерування) циклічних сигналів  $B_2$  для абстрактної циклічної функції складається із таких назв типових завдань:

$$B_2 = \left\{ \begin{array}{l} \text{Завдання попереднього опрацювання,} \\ \text{Завдання оцінювання атрибутів циклічності,} \\ \text{Завдання оцінювання атрибутів ритму,} \\ \text{Завдання кластеризації,} \\ \text{Завдання класифікації,} \\ \text{Завдання прогнозування,} \\ \text{Завдання регресії,} \\ \text{Завдання комп’ютерної імітації.} \end{array} \right\}$$

Розроблені формально-логічні моделі підонтологій для області "Моделювання та опрацювання циклічних сигналів" трансформовано в машинно-інтерпретовану форму за допомогою мови опису онтологій OWL DL та середовища Protégé. Як відомо, OWL (Web Ontology Language) є загально визнаним стандартом опису онтологій та у поєднанні із Protégé забезпечує графічний інтерфейс та можливість логічного виведення, полегшуючи розробку та верифікацію онтологій. Було здійснено верифікацію розробленої онтології, а саме, здійснено формальну перевірку її логічної несуперечності та змістовної повноти. Логічна несуперечність онтології підтверджується відсутністю логічних помилок у процесі перевірки засобами Protégé (із використанням вмонтованих у Protégé процедур автоматизованого формально-логічного розмірковування). Повнота онтології наразі не є досягнутою, оскільки ще не всі класи математичних моделей та методів опрацювання циклічних сигналів відображені в онтології.

## Висновки

У роботі удосконалено комп'ютерну онтологію предметної області "Моделювання та опрацювання циклічних сигналів", а саме, розроблено формально-логічну модель її конкретних підонтологій. На основі цієї моделі побудовано прототип комп'ютерної онтології в середовищі Protégé, що стало основою для створення експертної системи підтримки прийняття рішень в галузі цифрового опрацювання та комп'ютерної симуляції циклічних сигналів.

## REFERENCES

1. Lupenko, S. (2022). The Mathematical Model of Cyclic Signals in Dynamic Systems as a Cyclically Correlated Random Process. *Mathematics*, 10, 3406. <https://doi.org/10.3390/math10183406>
2. Lupenko, S.; Butsiy, R. (2024). Isomorphic Multidimensional Structures of the Cyclic Random Process in Problems of Modeling Cyclic Signals with Regular and Irregular Rhythms. *Fractal Fract.*, 8, 203. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8040203>
3. Lupenko, S. (2024). Rhythm-adaptive statistical estimation methods of probabilistic characteristics of cyclic random processes. *Digital Signal Processing*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2024.10456>
4. Lupenko, S. (2023). The rhythm-adaptive Fourier series decompositions of cyclic numerical functions and one-dimensional probabilistic characteristics of cyclic random processes. *Digital Signal Processing*, 104104, ISSN 1051-2004, <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2023.104104>
5. Gardner, W. A., Napolitano, A., & Paura, L. (2006). Cyclostationarity: Half a century of research. *Signal Processing*, 86, 639–697.
6. Hurd, H. L. (2007). *Periodically Correlated Random Sequences: Spectral Theory and Practice*. The University of North Carolina at Chapel Hill Hampton University.
7. Napolitano, A. (2019). *Cyclostationary Processes and Time Series. Theory, Applications, and Generalizations*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-04240-4>
8. Dragan, Ya., Yevtukh, P., Sikora, L., & Yavorsky, B. (2000). Periodically correlated random processes as adequate models of signals of multiple rhythms of natural phenomena and technological processes. *Computer technologies of printing*, 4, 269–290. (In Ukrainian). [Драган, Я., Євтух, П., Сікора, Л., Яворський, Б. (2000). Періодично корельовані випадкові процеси як адекватні моделі сигналів кратної ритміки природних явищ і технологічних процесів. *Комп'ютерні технології друкарства*, 4, 269–290].

9. Dorogovtsev, A.Y. (1990). Stationary and periodic solutions of stochastic difference and differential equations in Banach space. In *New Trends in Probability and Statistics* (Vol. 1, pp. 375–390). VSP: Utrecht, The Netherlands.
10. Marchenko, B.G. (1999). Linear periodic processes. *Pr. Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. Electrical engineering*, 165–182. (In Ukrainian). [Марченко, Б.Г. (1999). Лінійні періодичні процеси. *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка*, 165–182].
11. Nematollahi, A.R. (2000). Discrete time periodically correlated Markov processes. *Probability and Mathematical Statistics*, 20 (1), 127–140.
12. Lupenko, S., Stadnyk, N., & Nnamene, Ch. (2019). An approach to constructing a taxonomic tree of models cyclic signals in the tasks of developing an onto-oriented system for decisions supporting of models choice. In *9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*" June 5-7, 2019 in Ceske Budejovice, Czech Republic (pp. 89-92). ISBN 978-1-7281-0449-2
13. Lupenko, S.A., Lytvynenko, Ia.V., Zozulya, A.M., Nnamene K. Chizoba, & Volyanyk, O.V. (2021). Models, methods and means of ontology development of cyclic signal processing. *Journal of Hidrocarbon Power Engineering*, 8 (1), 8-17.
14. Smith, B. (2003). *Ontology: philosophical and computational*. Oxford, USA: Blackwell Publishers.
15. Gomez-Perez, A., Fernandez-Lopez, M., & Corcho, O. (2004). *Ontological engineering*. London: Springer-Verlag.
16. Guarino, N. (1998). Formal ontology and information systems. In *Proc. 1st Int. Conf. on formal ontologies in information systems*, Italy (pp. 3-15).
17. Gruber, T. (1991). The role of common ontology in achieving sharable, reusable knowledge bases. In *Proc. 2nd Int. Conf.*
18. Rasmussen, J., Pejtersen, A., & Goodstein, L. (1994). *Cognitive Systems Engineering*. New York, USA: Wiley-Interscience.
19. Gene ontology. [Online]. Retrieved May 01, 2024 from <http://www.geneontology.org>
20. SNOMED International. [Online]. Retrieved May 01, 2024 from <http://www.snomed.org/>
21. FMAOntology. [Online]. Retrieved May 01, 2024 from <http://si.washington.edu/projects/fma>

*Стаття надійшла до редакції 02.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 16.09.2024*

*The article was received 02.05.2024 and was accepted after revision 16.09.2024*

#### **Лупенко Сергій Анатолійович**

доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6559-0721> **e-mail:** [lupenko.san@gmail.com](mailto:lupenko.san@gmail.com)

#### **Волянник Олександр Вадимович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9137-7580> **e-mail:** [wonderage2018@gmail.com](mailto:wonderage2018@gmail.com)

УДК 502.51:504.5

**Volodymyr Yehorov**, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1738-1375> **e-mail:** volodymyregorov@ukr.net

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

## **SYSTEM OF AUTOMATED SOFTWARE CONTROL OF THE ANTENNA SYSTEM OF THE SATELLITE**

**Abstract.** *The work is devoted to the solution of a scientific and practical task, which consists in the development of methods, technologies and means of creating an information system for controlling the antenna system. At the current stage of development of radio monitoring, satellite communication systems have become widely used and have become an integral part of the telecommunications infrastructure of most countries. Not only developed countries with various telecommunication networks, but increasingly developing countries are successfully implementing satellite communication systems.*

*Despite the high level of automation of radio technical complexes, in the antenna systems used nowadays, management methods based on manual adjustment, pointing to the source of radiation and diagnostics of the equipment included in the antenna system continue to be used. But nowadays, these control methods do not have a sufficient level of efficiency and cannot ensure high accuracy of guidance. Because of this, the question arose about the introduction of a new management method that will ensure the necessary efficiency in working with antenna systems for monitoring satellite communication networks.*

*The purpose of the work is to create a system of software control of the antenna system of the radio monitoring station of satellite communication networks, which will ensure the pointing of the directional diagram of the antenna system with high accuracy to the satellites, in order to obtain useful information.*

*These systems are based on the methods of automated management, processing and visual analysis, which allows to significantly increase the speed and accuracy of radio monitoring in case of an a priori uncertain state of the object of radio monitoring.*

**Keywords:** *information technologies, satellite communication systems, radio monitoring, data transmission channels, remote methods, technical complexes, radio monitoring objects.*

**В.О. Єгоров**

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

## **СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО УПРАВЛІННЯ АНТЕННОЮ СИСТЕМОЮ СУПУТНИКОВОГО РАДІОМОНІТОРИНГУ**

**Анотація.** *Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в розробці методів, технологій та засобів створення інформаційної системи керування антенною системою. На сучасному етапі розвитку ведення радіомоніторингу системи супутникового зв'язку набули широкого використання та стали невід'ємною частиною інфраструктури*

телекомунікації більшості країн. Не тільки розвинуті країни з різноманітними мережами телекомунікацій, але все частіше і країни, що розвиваються, успішно впроваджують супутникові системи зв'язку.

Незважаючи на високий рівень автоматизації радіотехнічних комплексів, в антенних системах, які застосовуються в наш час, продовжують використовуватись методи управління, що ґрунтуються на ручному налаштуванні, наведенні на джерело випромінювань і діагностиці обладнання, яке входить в антенну систему. Але на сьогодні дані методи управління не мають достатнього рівня ефективності і не можуть забезпечити високу точність наведення. Через це постало питання про впровадження нового методу управління, який буде забезпечувати потрібну ефективність в роботі з антенними системами моніторингу мереж супутникового зв'язку.

Метою роботи є створення системи програмного управління антенною системою станції радіомоніторингу мереж супутникового зв'язку, яка забезпечить наведення діаграми спрямованості антенної системи з високою точністю на супутники, для отримання корисної інформації.

Ці системи базуються на методах автоматизованого управління, обробки та візуального аналізу, що дозволяє суттєво підвищити швидкість і точність радіомоніторингу при апріорно невизначеному стані об'єкта радіомоніторингу.

**Ключові слова:** інформаційні технології, супутникові системи зв'язку, радіомоніторинг, канали передачі даних, дистанційні методи, технічні комплекси, об'єкти радіомоніторингу.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.99-105>

## Вступ

Сучасні та перспективні антенні пристрої помітно впливають на потенційні можливості й ефективність використання радіотехнічних систем, які експлуатуються.

При здійсненні радіомоніторингу з використанням гостронаправлених антен, необхідна висока точність наведення, реалізація якої, в свою чергу, потребує застосування прецизійних антенних приводів та систем управління ними. До складу цих приводів і систем управління входить велика кількість механічних, електромеханічних та електронних пристроїв, а також елементи автоматики та обчислювальної техніки. В цілому антенний привід разом з системою управління являє собою єдиний комплекс різних пристроїв, які пов'язані досить складними функціональними зв'язками. Експлуатація цих систем потребує від спеціаліста широкої ерудиції й знань в області механіки, електротехніки, електроніки, автоматики й обчислювальної техніки.

Ці системи базуються на методах автоматизованого управління, обробки та візуального аналізу, що дозволяє суттєво підвищити швидкість і точність радіомоніторингу при апріорно невизначеному стані об'єкта радіомоніторингу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Організація радіомоніторингу полягає у розподілі засобів радіомоніторингу на певні канали супутникового зв'язку, спостереженні визначених каналів та формуванні результатів за підсумками роботи. Розподіл засобів радіомоніторингу, в свою чергу, полягає в налаштуванні антенних систем на визначені космічні апарати зв'язку та спостереженні визначених каналів передачі даних.

Однак ресурс засобів радіорозвідки радіомоніторингу обмежений, тому одночасно поставити на радіомоніторинг усю сукупність супутникових каналів передачі даних неможливо.

В умовах збільшення кількості супутникових каналів передачі даних та апріорної невизначеності стану та режимів роботи супутників зв'язку час, необхідний на прийняття рішення щодо розподілу засобів, збільшується, що, в свою чергу, є негативним фактором щодо ведення радіомоніторингу в цілому. Крім того, через збільшення кількості абонентів зменшується повнота охоплення супутникових ліній зв'язку.

Можливими варіантами підвищення повноти охоплення супутникових ліній зв'язку є збільшення кількості засобів радіомоніторингу, покращення їх характеристик, можливостей або розробка нових засобів радіомоніторингу, які усунуть недоліки існуючих. Однак на розробку та впровадження нових засобів радіомоніторингу впливає їх велика вартість, що, в свою чергу, є вирішальним аспектом при вирішенні даного завдання. Тому перспективним напрямком є раціональне використання можливостей наявних засобів за рахунок удосконалення процесу розподілу при плануванні.

Таким чином, знаючи угруповання космічних апаратів зв'язку та можливості наявних засобів в умовах апріорної невизначеності щодо функціонування систем супутникового зв'язку, необхідно знайти такий варіант розподілу, що дозволить охопити спостереженням найбільш важливі канали зв'язку.

Крім того, на ефективність радіомоніторингу безпосередньо впливатиме ресурс часу, який необхідний для налаштування антенної системи на визначений супутник зв'язку.

Розвиток методів розподілу обмеженого ресурсу та методів управління антенними системами викладено в роботах Вороніна А.М., Зайченка Ю.П., Ротштейна А.П., Кіні Р.Л., Райфи Х., Пастернак Ю.В., Шишацького А.В.

**Метою** роботи є побудова системи програмного управління антенною системою станції радіомоніторингу мереж супутникового зв'язку, який заснований на точному наведенні діаграми спрямованості на ретрансляційні супутники, які знаходяться на орбітах Землі, для моніторингу мереж супутникового зв'язку.

Задачі програмного управління антенною системою станції радіомоніторингу можна розділити на дві загальні групи:

- задачі щодо введення інформації про місцезнаходження супутника та визначення місцезнаходження системи радіомоніторингу;
- задачі щодо наведення антени на визначений супутник.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

Одним із складових елементів системи супутникового моніторингу, який впливає на якість прийому сигналів, є пристрій управління – поворотний пристрій. Поворотний пристрій повинен постійно корегувати положення антени, яка встановлена на ньому, в залежності від положення супутника на небосхилі. Незважаючи на високий рівень автоматизації радіотехнічних комплексів, в системах супутникового радіомоніторингу продовжують використовуватись методи управління, що ґрунтуються на ручному налаштуванні при наведенні на джерело випромінювань і діагностиці обладнання, яке входить в систему радіомоніторингу. Ці методи управління не

мають достатнього рівня ефективності і не можуть забезпечити високу точність наведення. Через це постало питання про впровадження нового методу управління, який буде забезпечувати потрібну ефективність в роботі з антенними системами супутникового радіомоніторингу.

Як правило, система позиціонування антени складається з двох частин: перша – поворотний пристрій, який дозволяє виконувати позиціонування антени за азимутальним кутом та кутом елевації, має в своєму складі необхідні механічні, електричні, електромеханічні складові, які здійснюють привід механічних частин, їх контроль та управління режимами роботи; друга – контролер управління поворотним пристроєм, який дозволяє здійснити управління кутами поворотного пристрою за допомогою персонального комп'ютера. Контролер підключається до комп'ютера через СОМ-порт та обмінюється даними з програмним забезпеченням. В якості програмного забезпечення контролера використовується програма відстеження місцеположення супутників Землі, координати яких безпосередньо зчитуються програмним забезпеченням та відпрацьовуються в апаратній частині поворотного пристрою. Система виконує точне налаштування антени на визначений оператором супутник. В якості керуючого пристрою обрано ArduinoUno, використано мікроконтролер АТМega328 та в якості елемента дистанційного керування обрано bluetooth-модуль HC 05.

На рисунках 1 та 2 показані принципова схема управління поворотним пристроєм та інтерфейс програми управління антенною системою радіомоніторингу.

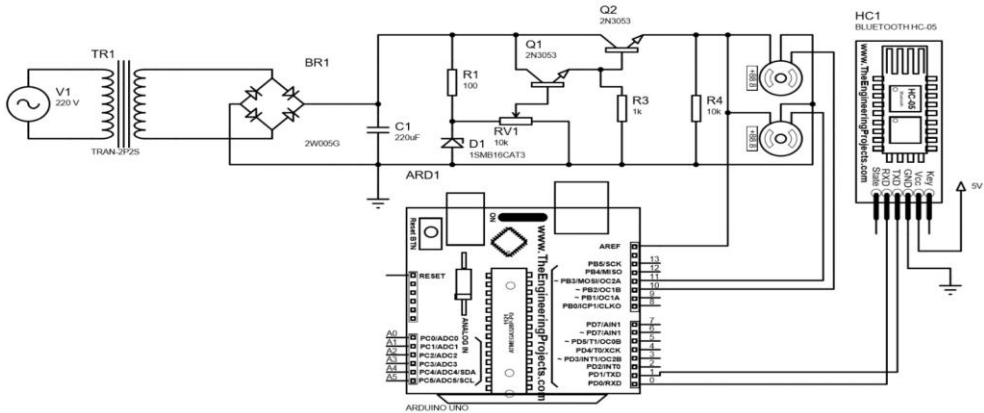


Рис. 1. Принципова схема управління поворотним пристроєм

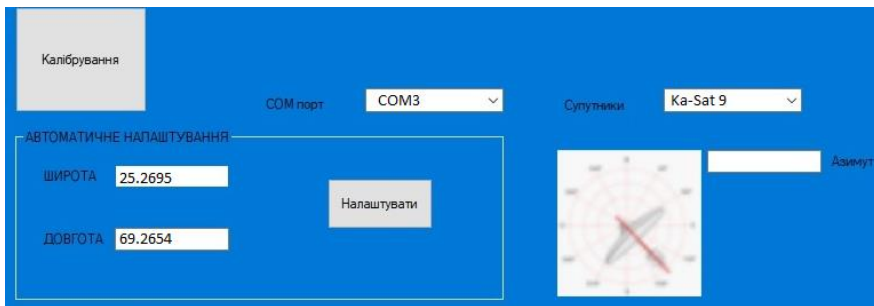


Рис. 2. Інтерфейс програми управління антенною системою станції радіомоніторингу

Для створення програми обрахунку кута місця і азимуту на супутник та управління пристроєм обертання обрано середовище розробки Microsoft Visual Studio. Цей продукт дозволяє розробляти як консольні програми, так і програми з графічним інтерфейсом, в тому числі з підтримкою технології Windows Forms. Програмне управління написано мовою C# в інтерфейс програмування додатків Windows Forms.

Основні задачі, які вирішуватиме програмне управління антенною системою:

- настроювання портів для зв'язку з мікроконтролером;
- перевірка органів системи керування;
- налаштування антени на супутник.

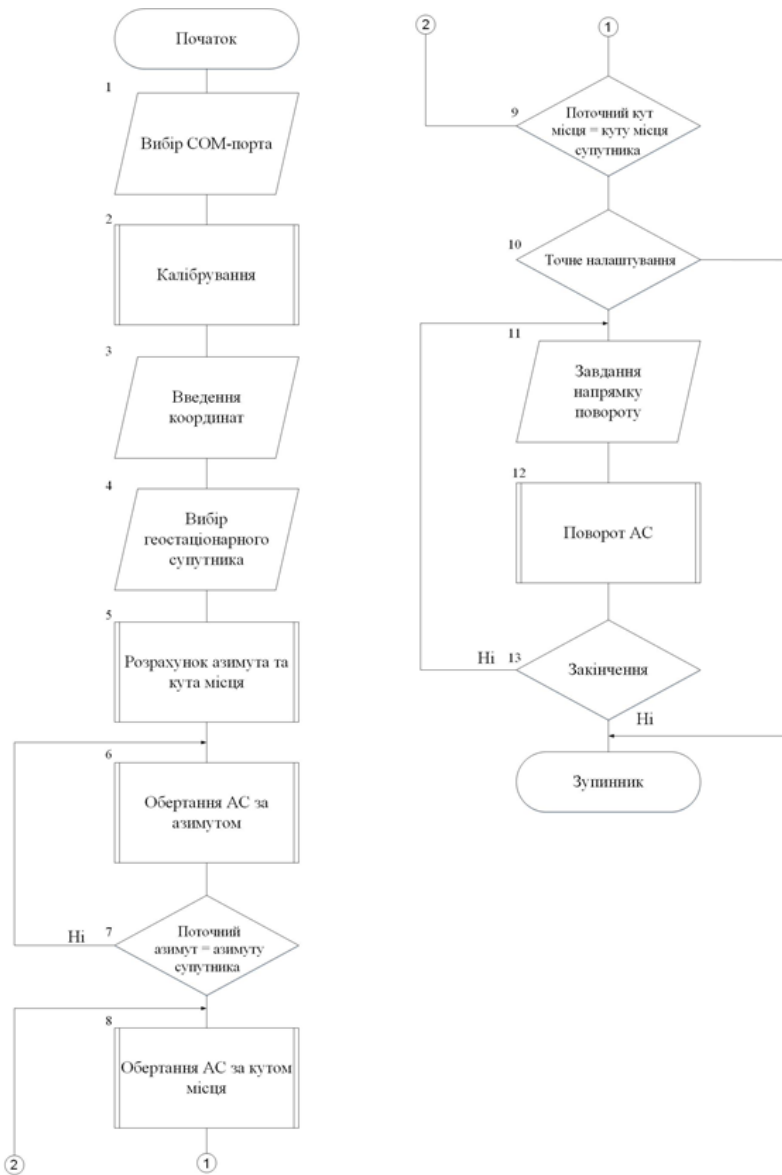


Рис. 3. Алгоритм роботи пристрою управління АС



Алгоритм роботи програмного управління складається з наступних блоків (рисунок 3):

- 1) блок 1 – вибір СОМ-порта;
- 2) блок 2 – калібрування;
- 3) блок 3 – введення координат;
- 4) блок 4 – вибір супутника;
- 5) блок 5 – розрахунок азимута та кута місця;
- 6) блок 6 – обертання антенної системи за азимутом;
- 7) блок 7 – поточний азимут дорівнює азимуту супутника;
- 8) блок 8 – обертання антенної системи за кутом місця;
- 9) блок 9 – поточний кут місця дорівнює куту місця супутника;
- 10) блок 10 – точне налаштування;
- 11) блок 11 – задання напрямку повороту;
- 12) блок 12 – поворот антенної системи;
- 13) блок 13 – закінчення.

## Висновки

Точне автоматизоване наведення антенної системи на супутник зв'язку здійснюється за рахунок застосування програмного методу наведення антенної системи, який дозволяє прогнозувати траєкторії руху супутника в системі координат, прив'язаній до даної станції, формувати сигнали управління силовим слідкуючим приводом антени у відповідності з цілевказівками, вводити систематичні поправки щодо вимірних помилок наведення для відповідної корекції сигналів управління. Використання сучасної елементарної бази дозволило спростити конструкцію пристрою програмного управління антенною системою та підвищити його надійність та точність роботи. Впровадження пристрою дозволить підвищити точність та надійність роботи, що, в свою чергу, збільшить ефективність ведення радіомоніторингу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Arkhypova L., Vinnychenko I., Kinash I., Horoshkova L., Khlobystov I. (2022). Theoretical Substantiation of Modeling of Recreational Systems. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(5), 99–108.
2. Mandryk O., Moskalchuk N., Arkhypova L., Prykhodko M., Pobigun O. (2020). Prospects of environmentally safe use of renewable energy sources in the sustainable tourism development of the Carpathian region of Ukraine, *E3S Web Conference*, Ukraine, 7.
3. Myrontsov, M.L., Dovgyi, S.O., Trofymchuk, O.M., Lebid, O.G., Okhariev, V.O. (2022). Development and testing of tools for modeling R&D works in geophysical instrument-making for oil and gas well electrometry. *Science and Innovation*, 18(3), pp. 28–36.
4. Trysnyuk V., Trysnyuk T., Nikitin A., Kurylo A., Demydenko O. (2021). Geomodels of space monitoring of water bodies. *ICSF 2021. E3S Web of Conferences* 280.
5. Zasidko, I., Polutrenko, M., Mandryk, O., Stakhmych, Y., Petroschuk, N. (2019). Complex Technology of Sewage Purification from Heavy-Metal Ions by Natural Adsorbents and Utilization of Sewage Sludge. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 209–216.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. [2019]. Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.

7. Красовський Г.Я., Петросов В.А. Інформаційні технології. – К.: Наукова думка, 2003. – 224 с.
8. Самойленко В.М. Географічні інформаційні системи та технології: Підручник. – К.: Ніка-Центр, 2010. – 448 с.

*Стаття надійшла до редакції 10.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 03.12.2024*

## REFERENCES

1. Arkhypova, L., Vinnychenko, I., Kinash, I., Horoshkova, L., & Khlobystov, I. (2022). Theoretical Substantiation of Modeling of Recreational Systems. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(5), 99–108.
2. Mandryk, O., Moskalchuk, N., Arkhypova, L., Prykhodko, M., & Pobigun, O. (2020). Prospects of environmentally safe use of renewable energy sources in the sustainable tourism development of the Carpathian region of Ukraine. In *E3S Web Conference*, Ukraine, 7.
3. Myrontsov, M.L., Dovgyi, S.O., Trofymchuk, O.M., Lebid, O.G., & Okhariev, V.O. (2022). Development and testing of tools for modeling R&D works in geophysical instrument-making for oil and gas well electrometry. *Science and Innovation*, 18(3), pp. 28–36.
4. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Nikitin, A., Kurylo, A., & Demydenko, O. (2021). Geomodels of space monitoring of water bodies. In *ICSF 2021, E3S Web of Conferences* 280.
5. Zasadko, I., Polutrenko, M., Mandryk, O., Stakhmych, Y., & Petroshchuk, N. (2019). Complex Technology of Sewage Purification from Heavy-Metal Ions by Natural Adsorbents and Utilization of Sewage Sludge. *Journal of Ecological Engineering*, 20(5), 209–216.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., & Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Extended Abstracts.
7. Krasovsky, G.Ya., & Petrosov, V.A. (2003). Information technologies. Kyiv: Naukova dumka [in Ukrainian].
8. Samoilenko, V.M. (2010). Geographic information systems and technologies: Textbook. Kyiv: Nika-Center [in Ukrainian].

*The article was received 10.09.2024 and was accepted after revision 03.12.2024*

### **Єгоров Володимир Олександрович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-1738-1375> **e-mail:** volodymyregorov@ukr.net

УДК 532.593.5

**Volodymyr Voskoboinick**, 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

**Oleksandr Voskoboinyk**, PhD, Associate professor of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NASU

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

**Anatolii Kharchenko**, Senior engineer electrician of the Department of Hydrodynamics of Wave and Channel Flows of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5832-7714> **e-mail:** kharchenko62@gmail.com

**Andrii Voskobiinyk**, PhD, Associate professor of the Department of Hydrobionics and Boundary Layer Control of Institute of Hydromechanics of the NAS Ukraine

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8045-8625> **e-mail:** andrew.vsk@gmail.com

Institute of Hydromechanics of the National Academy Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## TRANSFORMATION OF WAVE FIELD BY PERMEABLE VERTICAL WALL

**Abstract.** *Laboratory experimental studies were conducted to study the interaction of gravity waves with models of permeable vertical walls, which are formed by piles of circular cross-section. Experiments were conducted in a wave channel, where waves of different height, period and wavelength were generated. Visual studies using video and photo equipment and instrumental studies using piezoresistive wave height sensors and wave pressure fluctuation sensors were performed. The use of a group of sensors made it possible to determine the spatio-temporal characteristics of the wave field and the features of the transformation of waves during their interaction with continuous and permeable vertical walls. Statistical methods of processing and analyzing experimental data made it possible to obtain integral and spectral characteristics of wave motion both in front of the vertical wall and behind it. It was established that the heights of waves in front of the permeable vertical wall and the heights of reflected waves increase with a decrease in wall permeability and wavelength and an increase in the frequency of the wave field. It was determined that the power spectral densities of wave pressure fluctuations have the highest values immediately in front of the frontal part of the vertical wall, and these levels decrease as the permeability of the wall increases. A particularly significant increase in the levels of pressure fluctuations was observed in the high-frequency region, which is due to the action of high-frequency small-scale pressure sources, which are small-scale components of the wave motion generated during the interaction of the incoming wave with the vertical wall. The results of research showed that a permeable vertical wall with piles of a circular cross section is a sufficiently effective protective structure that significantly reduces the penetration of storm waves into the protected water area, especially in conditions of low permeability, this design also allows improving environmental conditions and significantly saving material resources during construction coastal protection structure.*

**Key words:** *gravitational wave, permeable breakwater, experimental research, high wave sensors, reflection and transmission waves, spectral levels.*

В.А. Воскобійник, О.А. Воскобойник, А.Г. Харченко, А.В. Воскобійник

Інститут гідромеханіки НАН України, м. Київ, Україна

## ТРАНСФОРМАЦІЯ ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ ПРОНИКНОЮ ВЕРТИКАЛЬНОЮ СТІНКОЮ

**Анотація.** Проведено лабораторні експериментальні дослідження з метою вивчення взаємодії гравітаційних хвиль з моделями проникних вертикальних стінок, які утворені палями кругового поперечного перерізу. Досліди проводилися у хвильовому каналі, де генерувалися хвилі різної висоти, періоду та довжини хвилі. Були виконані візуальні дослідження із застосуванням відео- і фотоапаратури та інструментальні дослідження з використанням п'єзорезистивних датчиків висоти хвиль та датчиків пульсацій хвильового тиску. Використання групи датчиків дозволило визначити просторово-часові характеристики хвильового поля та особливості трансформації хвиль під час їх взаємодії з суцільними та проникними вертикальними стінками. Статистичні методи обробки і аналізу експериментальних даних дали можливість отримати інтегральні та спектральні характеристики хвильового руху як перед вертикальною стінкою, так і позаду неї. Установлено, що висоти хвиль перед проникною вертикальною стінкою та висоти відбитих хвиль збільшуються зі зменшенням проникності стінки і довжини хвиль та збільшенням частоти хвильового поля. Визначено, що спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску мають найбільші значення безпосередньо перед фронтальною частиною вертикальної стінки і зі збільшенням проникності стінки ці рівні зменшуються. Особливо значне збільшення рівнів пульсацій тиску спостерігалось в області високих частот, що обумовлено дією високочастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються під час взаємодії прийдешньої хвилі з вертикальною стінкою. Результати досліджень показали, що проникна вертикальна стінка з палями кругового поперечного перетину є достатньо ефективною захисною спорудою, що суттєво зменшує проникнення штормових хвиль у захищену акваторію, особливо в умовах незначної проникності, також ця конструкція дозволяє поліпшити екологічні умови та значно зекономити матеріальні ресурси під час будівництва берегозахисної споруди.

**Ключові слова:** гравітаційна хвиля, проникний хвилелом, експериментальні дослідження, датчики висоти хвиль, відбиті та проникні хвилі, спектральні рівні.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.106-121>

### Вступ

У прибережних областях здійснюється будівництво та експлуатація великої кількості гідротехнічних споруд, причалів, зон та баз відпочинку. Основна проблема розвитку цих областей та прибережних акваторій – це захист берегів, гаваней та морської інфраструктури. Засоби захисту повинні мати високу ефективність, підвищену екологічну безпеку і бути найбільш надійними і, по можливості, дешевими. Існує багато типів прибережних захисних споруд. Це греблі, буни, берми, хвилеломи та штучні пляжі, бухти, гавані. Захисні споруди активного, пасивного чи комплексного типу дії повністю або частково

захищають прибережні споруди та берегову зону. Ці споруди будуються у вигляді суцільних, переривчастих і проникних стін, похилих дамб і хвилеломів, заглиблених, плавучих і конструкцій, що виступають над поверхнею моря.

Залежно від виду споруди, її розташування в морській акваторії, принципу і механізму дії хвильове поле частково або повністю відбивається від споруди, трансформується і проникає через неї, зменшуючи хвильові навантаження на об'єкти, що захищаються. Берегозахисні споруди впливають на переміщення донних відкладень, змінюють циркуляцію прибережної течії та екологічну обстановку в акваторії, що захищається. Хвилі і дамби є найбільш широко використовуваними берегозахисними спорудами. Хвилеломи встановлюються паралельно або перпендикулярно до берега для забезпечення безпечного плавання в гавані та захисту берегової лінії від ерозії. Дамби споруджуються вздовж берегової лінії для захисту берега, зменшення ерозії берегової лінії та впливу нагонів та хвиль на прибережну інфраструктуру.

Дія гідродинамічного тиску на стінку хвилелому приводить до появи значних навантажень на споруду. Щоб витримати такі навантаження, споруди робляться масивними та міцними із застосуванням великих капітальних вкладень [1, 2]. Екологічні обмеження та зростаючі витрати на будівництво берегозахисних споруд, наприклад, вертикальних або похилих хвилеломів, вимагають розгляду альтернативних рішень традиційним повністю захисним спорудам. Для подолання вищезазначених проблем застосовуються проникні хвилеломи. Такий хвилелом зменшує відбиття хвиль, що набігають, відносно суцільної вертикальної стінки, забезпечує часткове проходження хвиль прийняттого рівня в акваторію, що захищається, а також дозволяє обмінюватися рідиною між відкритим морем і захищеною областю. Крім того, проникна стінка дає можливість безперешкодно переміщатися морській фауні та формує течії, які впливають на переміщення донних відкладень та забруднень на поверхні захищеної акваторії [3-5].

На висоту хвиль, що проникають через хвилелом, діаметр палі мало впливає, а більший вплив робить ширина зазору. Так, наприклад, зменшення ширини зазору з 20% до 10% знизило значення коефіцієнта пропускання або трансформації хвилі ( $C_T$ ) на 30% [6, 7]. Крім того, коефіцієнт пропускання хвилі зменшується зі збільшенням крутизни хвилі ( $h_i / \lambda$ ), де  $h_i$  – висота прийдецьної хвилі,  $\lambda$  – довжина хвилі. У роботі [8] показано, що пористість стінки близько 20% забезпечує мінімальне відбиття хвилі. У роботі [9] встановлено, що коефіцієнт пропускання хвилі виявився функцією кількості щільних стінок, пористості, орієнтації, крутизни хвилі, відносної глибини та зазору між стінками. У роботі [10] показано, що хвилелом із квадратними палями на 20-25% ефективніше, ніж із круглими палями. У роботі [11] досліджували зигзагоподібний хвилелом і показали, що значно зменшилося хвильове навантаження та коефіцієнт відбиття хвилі ( $C_R$ ).

Результати розрахунків та вимірювань коефіцієнтів трансформації хвилі [12-14] показали, що зі збільшенням  $kH$ , де  $k = 2\pi / \lambda$  – хвильове число та  $H$  – глибина води, коефіцієнт відбиття хвилі збільшується, а коефіцієнт проходження хвилі навпаки зменшується. Це вказує на те, що довгі хвилі мало трансформуються таким хвилеломом. Збільшення пористості призводить до

збільшення течії через хвилелом, а також зменшення  $C_R$  та збільшення  $C_T$ . Збільшення крутизни хвилі призводить до зниження коефіцієнта проходження хвилі та збільшення коефіцієнта відбиття хвилі [15, 16]. Це пов'язано зі збільшенням дисипації енергії всередині хвилелому при вищій крутизні хвилі і узгоджується з тенденціями, описаними [17-19] для повністю зануреного хвилелому.

Під час проходження хвиль через щілини виникають великі градієнти тиску між навітряною та підвітряною сторонами хвилелому та утворюються течії з високими горизонтальними швидкостями. Максимальні градієнти тиску та, відповідно, максимальні швидкості течії спостерігаються під час підходу хвильового гребня та западини хвилі.

У роботі [20] показали, що пропускання хвилі зменшується практично лінійно зі збільшенням висоти хвилі і трохи вище для похилих щілинних стінок, ніж для вертикальних щілинних стінок. У роботі [21] показали, що похилі пористі стінки розсіюють більше енергії хвиль і зменшують коефіцієнт відбиття більш ефективно, ніж вертикальні щілинні стінки [22].

Існує дві точки зору на оцінку взаємодії хвиль з вертикальними суцільними та проникними хвилеломами. Першим є метод потенційної течії, який ґрунтується на розрахунку потенційної функції для відповідних граничних умов [1, 23-25]. Цей метод ґрунтується на рівняннях збереження енергії, кількості руху та маси. У цій теорії хвильове навантаження на конструкцію визначається максимальною горизонтальною швидкістю течії рідини через щілини та пори споруди з найбільшим градієнтом тиску. Другий метод заснований на принципі втрати напору в процесі протікання рідини через конструкцію [26-29].

**Мета роботи** – вивчення особливостей взаємодії морських хвиль з моделями берегозахисних споруд проникного типу у вигляді вертикальних стінок.

## **Програма та методика досліджень**

Визначення особливостей трансформації гравітаційних хвиль поблизу проникних вертикальних стінок 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 [30-32]. Для виконання цих наукових робіт було створено експериментальний стенд на базі хвильового каналу і досліди проводилися в лабораторних умовах.

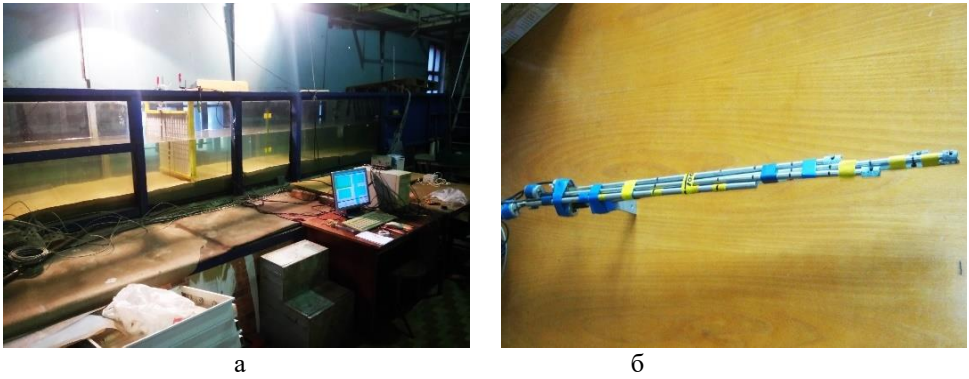


Рис. 1. Експериментальний стенд (а) та п'єзорезистивні датчики висоти хвиль (б)

Експерименти проводилися в хвильовому каналі довжиною близько 50 м, де на відстані близько 40 м від щитового генератора хвиль було зроблено вимірювальну ділянку. 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 укісний щільний поглинач хвиль. Хвильовий канал заповнювався водою на глибину 0,4 м або 0,5 м над піщаним дном в залежності від виконуваних дослідних робіт. Бокові стінки каналу були виготовлені з протиударного скла для проведення візуальних досліджень та відеофотозйомки. Ширина каналу складала 1,0 м і висота каналу була також 1,0 м.

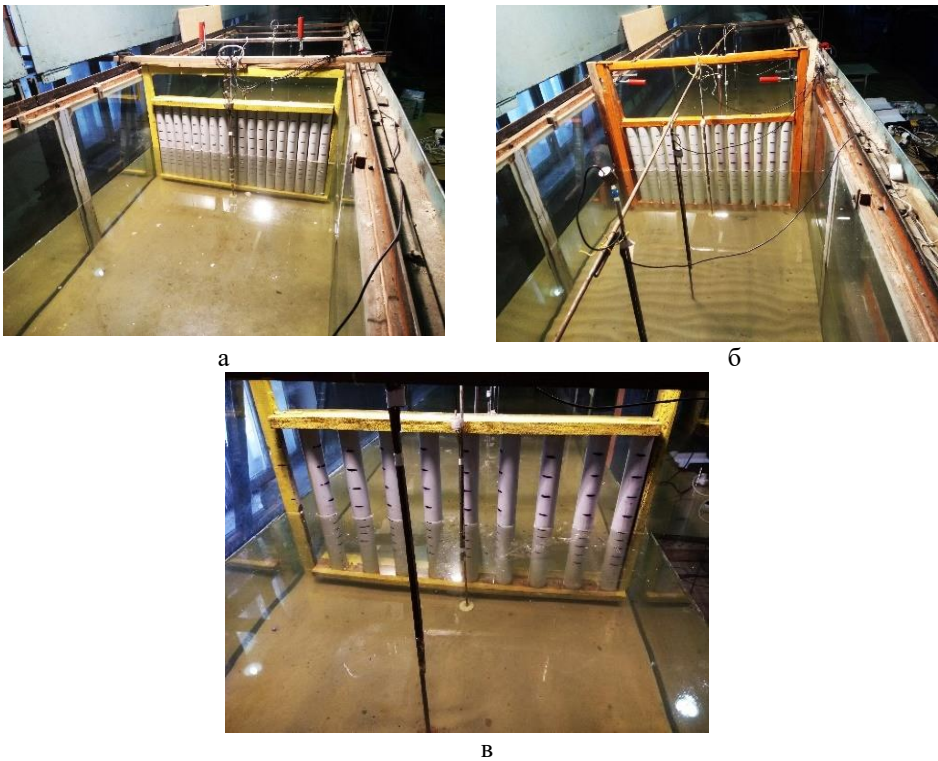


Рис. 2. Фотографії моделей паливових проникних вертикальних стінок: суцільна стінка (а), стінка проникністю 20% (б) та проникністю 50% (в)

Експериментальний стенд було обладнано контрольно-вимірною апаратурою, датчиками, координатними пристроями, системами фіксації датчиків, апаратурою реєстрації даних, комп'ютерною технікою [33, 34]. Вимірювання висоти хвиль, а також хвильового тиску було здійснено за допомогою п'єзорезистивних датчиків динамічного тиску, фотографію яких наведено на рис. 1б. П'єзорезистивні датчики динамічного тиску вимірювали тиск у тонкостінних трубках, які було занурено під поверхню води. Під дією хвильового поля тиск в трубках змінювався у відповідності до параметрів хвиль і реєструвався цими високочастотними (чутливість 2 Па) датчиками [35, 36].

Експериментальні дослідження впливу проникних вертикальних стінок на трансформацію гравітаційних хвиль проводилися в лабораторних умовах у хвильовому каналі з вертикальними стінками пальового типу з палями кругового поперечного перерізу. Моделі пальових конструкцій мали різну проникність і розташовувалися перпендикулярно напрямку руху хвиль від генератора хвиль щитової конструкції. Приклади проникних вертикальних стінок наведені на рис. 2.

На цих фотографіях разом з моделями суцільної вертикальної стінки (рис. 2а) та проникних вертикальних стінок проникністю 20% (рис. 2б) і проникністю 50% (рис. 2в) показані п'єзорезистивні датчики висоти хвиль, які розташовані як перед вертикальними спорудами, вимірюючи висоти прийдешньої та відбитої хвилі, так і позаду них, вимірюючи висоти проникної хвилі.

Результати візуальних досліджень, фото- та відеоматеріал оброблявся за допомогою спеціально створеної графічної комп'ютерної станції, де матеріали візуальних досліджень оброблялися та аналізувалися за допомогою спеціальних програм і алгоритмів, які дозволяли як прискорити, так і загальмувати зареєстровані відеокадри або зробити покадровий аналіз [37, 38].

Відфільтровані та підсилені електричні сигнали датчиків висоти хвиль і пульсації тиску (в досліді одночасно було задіяно 8 датчиків) поступали на 16-канальний аналогово-цифровий перетворювач, який було підключено до комп'ютера. Результати досліджень реєструвалися на стаціонарному (див., рис. 1а) або персональному комп'ютері з використанням вбудованого або виносного АЦП. 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 виконувалися 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.

## **Результати досліджень**

Візуальні дослідження та результати відеофотозйомок дозволили визначити якісні характеристики поведінки хвильового поля в околі досліджуваних моделей вертикальних стінок. Приклади взаємодії гравітаційних хвиль з проникними вертикальними стінками наведено на рис. 3 та на рис. 4. На рис. 3 наведені фотографії проходження гребня гравітаційної хвилі (рис. 3а) та її підшви (рис. 3б) через проникну вертикальну стінку проникністю 20%.



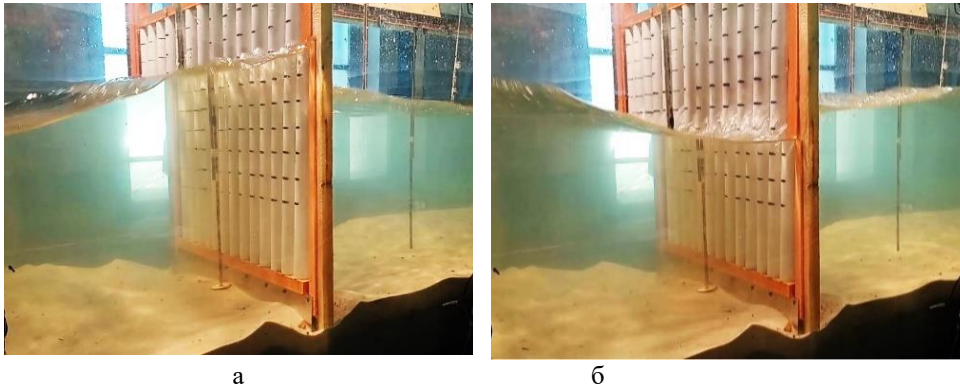


Рис. 3. Проходження гребня (а) та впадини (б) гравітаційної хвилі через проникну вертикальну стінку проникністю 20%

Результати досліджень показали, що для такої проникної стінки висоти гребня перед стінкою та позаду неї суттєво відрізняються, що обумовлено дією стінки як вертикального однорядного проникного хвилелому.

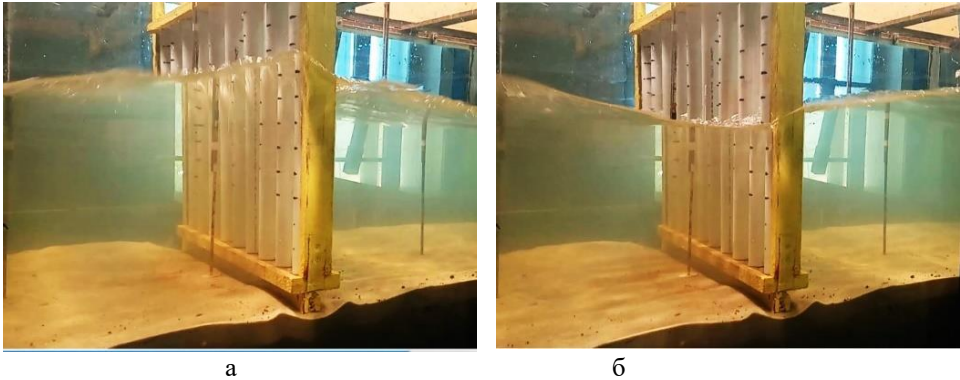


Рис. 4. Проходження гребня (а) та впадини (б) гравітаційної хвилі через проникну вертикальну стінку проникністю 50%

В момент взаємодії підшви прийдешньої хвилі з проникною стінкою спостерігалось значне перетікання рідини з кормової частини стінки в її фронтальну частину, як показано на рис. 3б. Треба зауважити, що значне перетікання рідини через щілини проникної стінки також спостерігалось під час взаємодії гребня хвилі зі стінкою, але в протилежному напрямку. Як показано на цих фотографіях, висоти хвиль перед проникною стінкою значно перевищують висоти проникних хвиль через досліджувану модель вертикальної стінки.

На рис. 4 наведені фотографії трансформації гравітаційної хвилі під час її взаємодії з проникною вертикальною стінкою проникністю 50%. Механізм взаємодії хвиль з такою стінкою подібний тому, що спостерігався для вертикальної стінки проникністю 20%. Але різниця у висотах хвиль перед фронтальною частиною стінки і її кормовою частиною значно зменшилася. Така стінка має менший хвильовий або гідравлічний опір і вона менше захищає прибережну зону від дії хвильового руху.

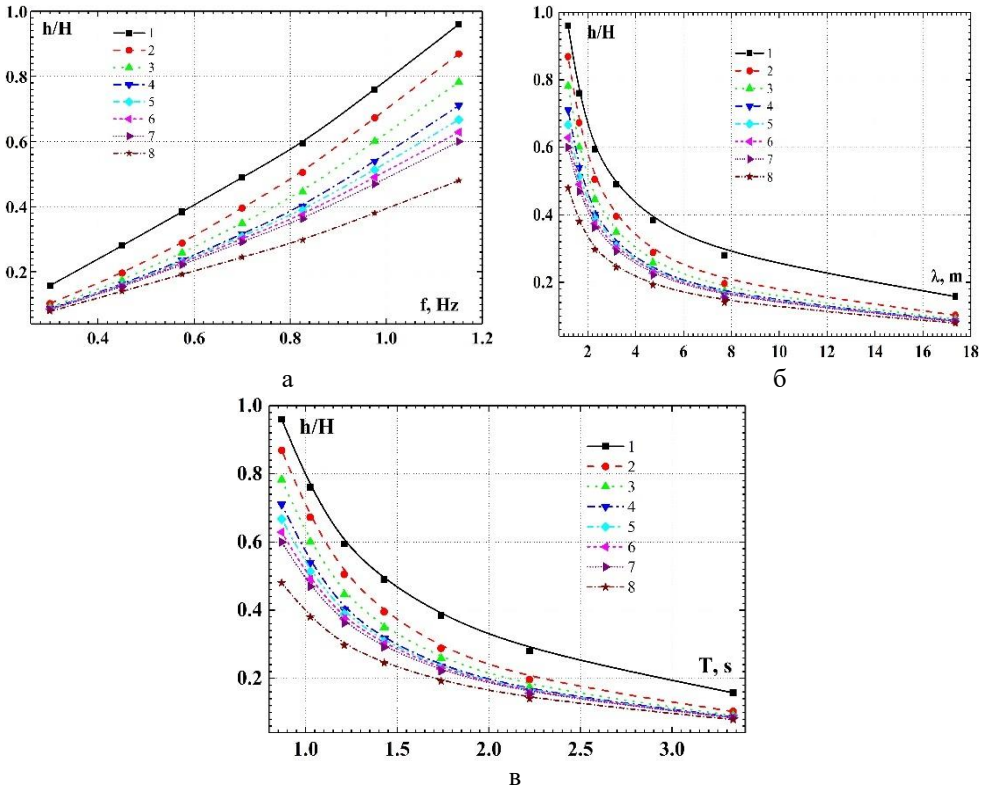


Рис. 5. Висоти хвиль перед проникними вертикальними стінками різної проникності в залежності від частоти прийдешньої хвилі (а), довжини хвиль (б) та їх періоду (в)

Якісні результати досліджень, які отримані з візуальних спостережень, відеофотозйомок, були підтверджені в результаті кількісних вимірювань хвильового поля за допомогою датчиків висоти хвиль та хвильового тиску, що розташовувалися вздовж поздовжньої осі хвильового каналу в околі досліджуваних моделей вертикальних стінок.

Результати вимірювання висоти хвилі поблизу суцільної та проникної вертикальної стінки, яку було утворено за допомогою циліндричних паль кругового поперечного перерізу показали, що перед стінкою та позаду неї на відстані близько діаметра палі висоти хвиль суттєво відрізняються від висоти прийдешньої хвилі. Так, на рис. 5 наведені результати вимірювання висот хвиль, нормованих глибиною каналу ( $h/H$ ), перед вертикальною стінкою різної проникності в залежності від частоти хвиль, їх довжини та періоду. Тут крива 1 виміряна для суцільної вертикальної стінки (проникність 0%), крива 2 – для стінки проникністю 10%, крива 3 – 20%, крива 4 – 30%, крива 5 – 40%, крива 6 – 50%, крива 7 – 60% і крива 8 наводить результати вимірювання висоти для прийдешньої хвилі.

Рис. 5а – це висоти хвиль в залежності від частоти хвилі. Результати досліджень показали, що перед вертикальною стінкою висоти хвиль значно перевищують висоту прийдешньої хвилі і ця різниця збільшується зі збільшенням частоти хвильового поля. Зменшення проникності вертикальної стінки призводить до збільшення різниці перед стінкою відносно висоти прийдешньої хвилі.

Рис. 5б – це висоти хвиль в залежності від довжини хвилі. Зі збільшенням довжини прийдешньої хвилі висоти хвиль перед вертикальною стінкою зменшуються, особливо для стінок великої проникності. Подібна тенденція спостерігається і для висоти хвиль перед вертикальною стінкою в залежності від періоду хвиль (див., рис. 5в).

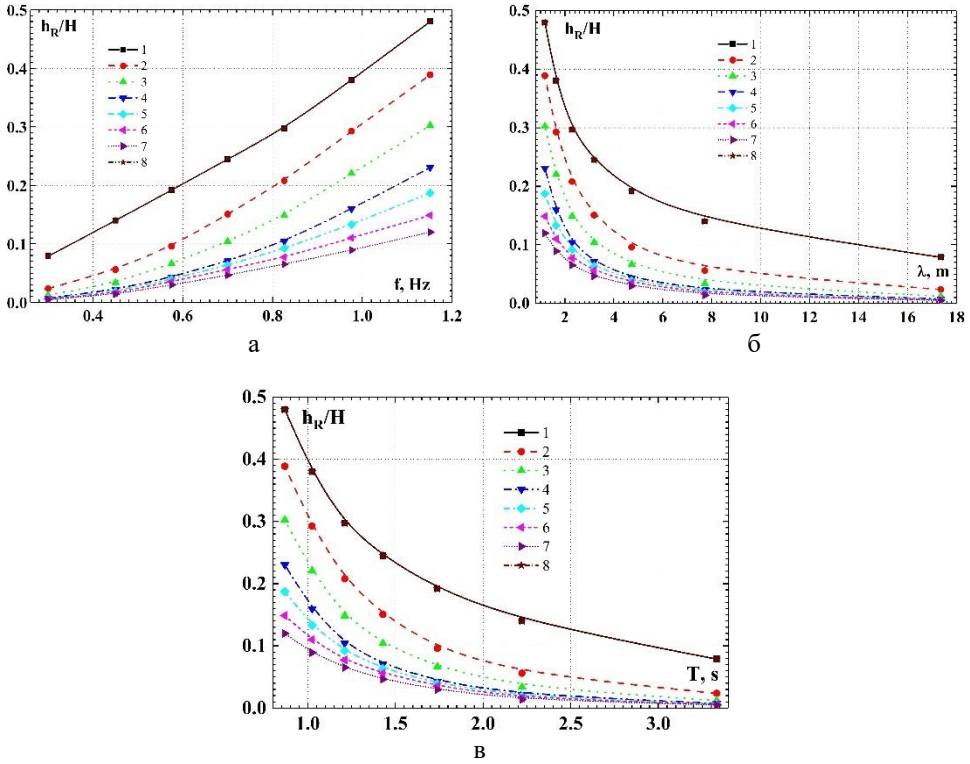


Рис. 6. Висоти відбитих хвиль перед проникними вертикальними стінками різної проникності в залежності від частоти прийдешньої хвилі (а), довжини хвиль (б) та їх періоду (в)

Залежності висоти відбитої хвилі на відстані довжини хвилі від вертикальної стінки, які визначалися як  $h_R = h - h_t$  та нормованої глибиною каналу ( $h_R / H$ ), представлені на рис. 6 в залежності від частоти хвиль, їх довжини та періоду. Тут крива 1 виміряна для суцільної вертикальної стінки (проникність 0%), крива 2 – для стінки проникністю 10%, крива 3 – 20%, крива 4 – 30%, крива 5 – 40%, крива 6 – 50%, крива 7 – 60% і крива 8 наводить результати вимірювання висоти для прийдешньої хвилі.

Результати досліджень показали, що висоти відбитих хвиль практично дорівнюють висотам прийдешніх хвиль на відстані однієї довжини хвилі перед вертикальною суцільною стінкою, що витікає із співставлення кривих 1 та 8 на рис. 6. Зі збільшенням проникності вертикальної стінки висоти відбитих хвиль суттєво стають меншими, ніж висоти прийдешніх хвиль. При цьому зі збільшенням частоти хвиль або зменшенням її довжини та періоду різниця висот відбитої та прийдешньої хвилі збільшується (див., рис. 6а, рис. 6б та рис. 6в, відповідно).

Оцінку впливу проникності вертикальних стінок на висоти проникних хвиль, нормованих глибиною каналу ( $h_T / H$ ), можна отримати під час аналізу результатів вимірювання висот проникних хвиль позаду вертикальних стінок в залежності від частоти, довжини та періоду прийдешньої хвилі, що показано на рис. 7.

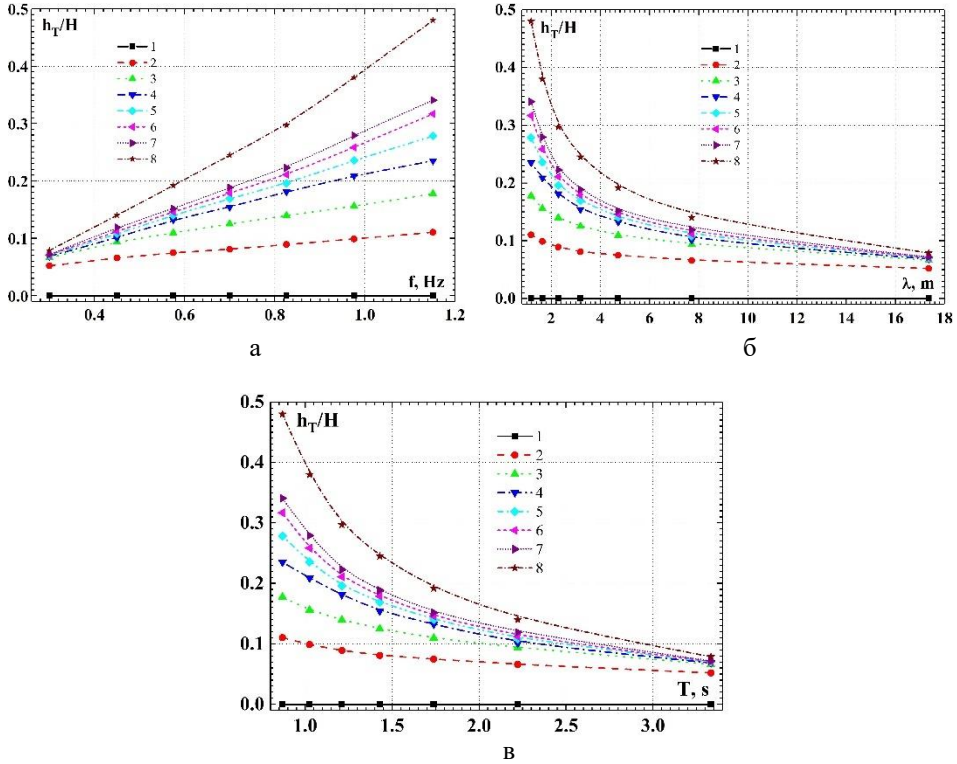


Рис. 7. Висоти проникних хвиль позаду проникних вертикальних стінок різної проникності в залежності від частоти прийдешньої хвилі (а), довжини хвиль (б) та їх періоду (в)

Результати досліджень показали, що висота проникної хвилі збільшується зі збільшенням проникності стінки, особливо зі збільшенням частоти хвилі або зменшенням її довжини чи періоду, як показано на рис. 7а, рис. 7б та рис. 7в, що корелює з результатами спостережень [39-42].

Результати досліджень висот хвильового поля, нормованих глибиною каналу ( $h/H$ ), в околі суцільної вертикальної стінки (див., рис. 2а) та поля пульсацій хвильового тиску перед такою стінкою показані на рис. 8. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля: період хвиль –  $T = 1.05$  с; довжина прийдешньої хвилі –  $h_i = 0.192$  м; довжина хвилі –  $\lambda = 1.73$  м; швидкість хвилі –  $U_w = 1.64$  м/с. Крива 1 виміряна на відстані  $-1.0\lambda$  перед суцільною стінкою, крива 2 отримана для відстані  $-0.25\lambda$ , крива 3 для відстані  $-0.001\lambda$  також перед стінкою.

Під час накочування гравітаційної хвилі на суцільну вертикальну стінку найбільша висота хвилі спостерігалася поблизу фронтальної поверхні стінки і складала близько 0,4 м, що майже вдвічі більше, ніж висота прийдешньої хвилі (див., рис. 8а).

Спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску перед суцільною вертикальною стінкою наведені на рис. 8б. Дослідження показали, що найбільші рівні пульсацій хвильового тиску спостерігалися безпосередньо перед фронтальною частиною суцільної стінки (крива 3 на рис. 8б), де прийдешня хвиля взаємодіє зі стінкою, утворюючи відбиту хвилю. Найменші рівні пульсацій тиску мали місце на відстані однієї довжини хвилі перед суцільною вертикальною стінкою (крива 1). З наближенням до фронтальної стінки інтенсивність поля пульсацій тиску збільшується в області високих частот. Цей діапазон спектральних рівнів обумовлений дією височастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються взаємодією прийдешньої хвилі з суцільною стінкою.

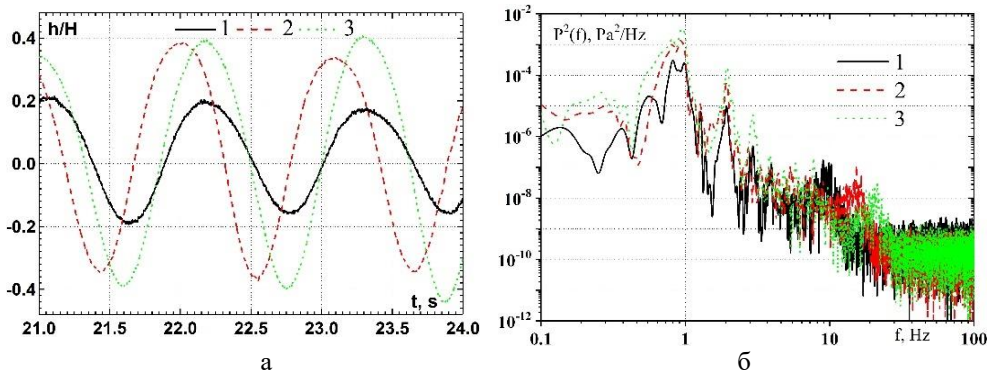


Рис. 8. Форма гравітаційних хвиль (а) та спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску (б) в околі суцільної вертикальної стінки

Результати досліджень висот хвильового поля, нормованих глибиною каналу ( $h/H$ ), в околі проникних вертикальних стінок та поля пульсацій хвильового тиску вертикальної стінки проникністю 20% показані на рис. 9. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля: період хвиль –  $T = 1.14$  с; довжина прийдешньої хвилі –  $h_i = 0.165$  м; довжина хвилі –  $\lambda = 2.03$  м; швидкість хвилі –  $U_w = 1.78$  м/с. Крива 1 виміряна на відстані  $-1.0\lambda$  перед проникною стінкою, крива 2 отримана для відстані  $-0.25\lambda$ , крива 3 для відстані  $-0.001\lambda$  також перед стінкою і крива 4 отримана для вимірювань позаду проникної стінки на відстані  $1.0\lambda$ .

Як показано на рис. 9а, найбільші висоти хвиль (близько 0,25 м) спостерігалися поблизу фронтальної стінки (крива 3), що майже у 1,5 раза більше, ніж висота прийдешньої хвилі. Позаду проникної вертикальної стінки висота проникної хвилі менша майже в (6-7) разів, ніж висота відбитої хвилі поблизу фронтальної стінки, що вказує на ефективність використання конструкції такого хвилелому в якості берегозахисної споруди.

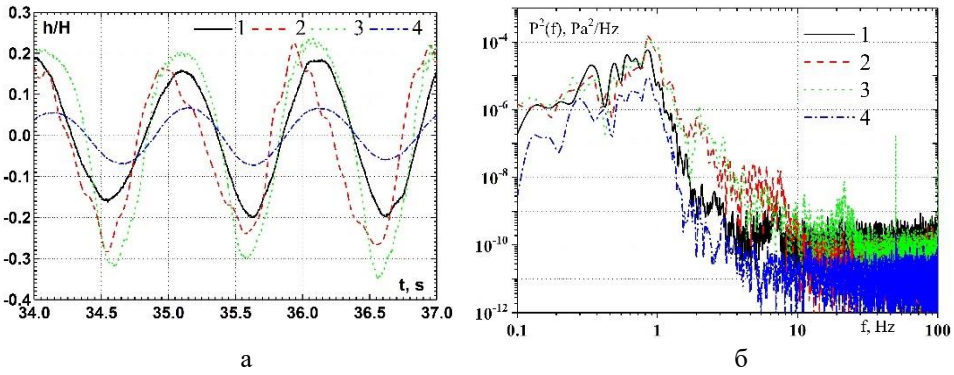


Рис. 9. Форма гравітаційних хвиль (а) та спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску (б) в околі вертикальної стінки проникністю 20%

Результати досліджень поблизу проникної вертикальної стінки проникністю 50% показані на рис. 10. Досліди проводилися для наступних умов хвильового поля: період хвиль –  $T = 1.18$  с; висота прийдешньої хвилі –  $h_i = 0.157$  м; довжина хвилі –  $\lambda = 2.18$  м; швидкість хвилі –  $U_w = 1.85$  м/с. Крива 1 виміряна на відстані  $-1.0\lambda$  перед проникною стінкою, крива 2 отримана для відстані  $-0.25\lambda$ , крива 3 для відстані  $-0.001\lambda$  також перед стінкою і крива 4 отримана для вимірювань позаду проникної стінки на відстані  $1.0\lambda$ .

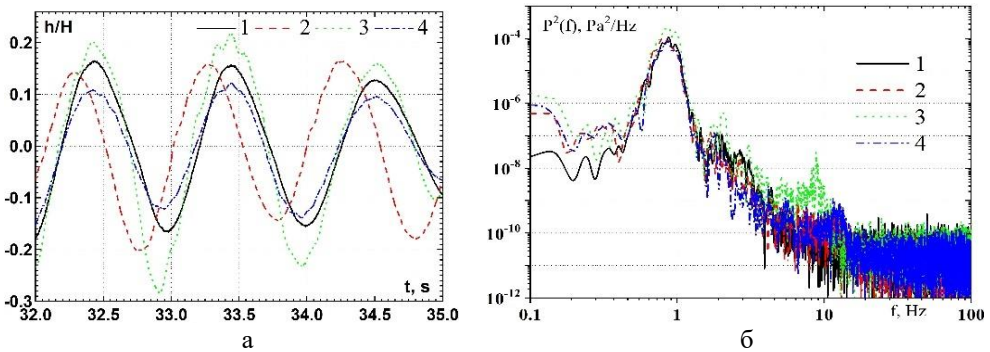


Рис. 10. Форма гравітаційних хвиль (а) та спектральні щільності потужності пульсацій хвильового тиску (б) в околі вертикальної стінки проникністю 50%

Як показано на рис. 10а, найбільші висоти хвиль (близько 0,2 м) спостерігалися поблизу фронтальної стінки (крива 3), що майже у 1,3 раза більше, ніж висота прийдешньої хвилі. Але для такої конструкції висота проникної хвилі достатньо значна і така проникна вертикальна стінка не значно захистить берегові споруди від дії хвильового руху.

Результати досліджень показали, що незалежно від проникності вертикальної стінки з наближенням до фронтальної частини стінки інтенсивність поля пульсацій тиску збільшується в області високих частот, де відбувається взаємодія прийдешньої хвилі зі стінкою та генерація інтенсивних дрібномасштабних хвильових структур.

## Висновки

Результати експериментальних досліджень показали, що:

1. Проникна вертикальна стінка з палями кругового поперечного перетину є достатньо ефективною захисною спорудою, що суттєво зменшує проникнення штормових хвиль у захищену акваторію, особливо в умовах незначної проникності, також ця конструкція дозволяє поліпшити екологічні умови та значно зекономити матеріальні ресурси під час будівництва берегозахисної споруди.

2. Установлено, що висоти хвиль перед проникною вертикальною стінкою та висоти відбитих хвиль збільшуються зі зменшенням проникності стінки та збільшенням частоти хвильового поля. Зі збільшенням довжини прийдешніх хвиль ці висоти навпаки зменшуються.

3. Показано, що залежності проникних через вертикальну стінку хвиль навпаки зменшуються зі зменшенням проникності стінки та збільшуються з ростом частоти хвиль і зменшуються зі збільшенням довжини прийдешніх хвиль.

4. Визначено, що спектральні густини потужності пульсацій хвильового тиску мають найбільші значення безпосередньо перед фронтальною частиною суцільної стінки і зі збільшенням проникності стінки ці рівні зменшуються. Особливо значне збільшення рівнів пульсацій тиску спостерігалось в області високих частот, що обумовлено дією високочастотних дрібномасштабних джерел тиску, якими є дрібномасштабні складові хвильового руху, що генеруються під час взаємодії прийдешньої хвилі з вертикальною стінкою.

## REFERENCES

1. Choopanizade, M. J., Bakhtiari, M., & Rostami, M. (2020). Wave transmission through the perforated half-depth block-made wall breakwater: An experimental study. *Ocean Engineering*, 215, 107895-1-9. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107895>
2. 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>
3. Selezov, I. T., Kryvonos, Yu. G., & Gandzha, I. S. (Eds.) (2018). Wave propagation and diffraction. Mathematical methods and applications. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4923-1>
4. Sathyanarayana, A. H., Suvarna, P. S., Banagani, V. K. Y., Umesh, P., & Shirlal, K. G. (2024). Investigating the wave attenuation capabilities of rectangular pile head breakwater: A physical modelling approach. *Ocean Eng.*, 298, 117251. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117251>
5. Sundar, V., Sannasiraj, S. A., Sriram, V., & Nowbuth, M. D. (Eds.) (2021). Proceedings of the Fifth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2019), Lecture Notes in Civil Engineering 106. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-8506-7>
6. Herbich, J. B. (1989). Wave transmission through a double-row Pile breakwater. Proc. 21st Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, Chapter 165, Torremolinos, Spain.
7. Nurzaman, L., Juwono, P. T., Dermawan, V., & Wijatmiko, I. (2024). Wave transmission coefficient of inclined pile breakwater based on a physical model. *J. Law and Sustainable Develop.*, 12(2), e02911. <https://doi.org/10.55908/sdgs.v12i2.2911>
8. Cox, R. J., Horton, P. R., & Bettington, S. H. (1998). Double walled low reflection wave barriers. Proc. International conference on Coastal Engineering, Copenhagen, June 22-26, 2221-2234.

9. Hall, K., & Thomson, G. (2001). Prediction of wave transmission through single and multiple wave screens. Proceedings of International Conference on Breakwaters, coastal structures and coastlines, ICE, Thomas Telford Publishers, London, 421-432.
10. Koraim, A. S. (2005). Suggested model for the protection of shores and marina. Ph.D. thesis in Civil Eng., Zagazig University, Zagazig, Egypt.
11. Mani, J. S. (2009). Experimental and numerical investigations on zigzag porous screen breakwater. *J. Natural Hazards*, Springer Netherlands, 49(2), 401-409.
12. Ahmed, H. (2011). Wave Interaction with Vertical Slotted Walls as a Permeable Breakwater. PhD Thesis.
13. Alturfi, U. A. S. M., & Shukur, A.-H. K. (2024). Investigation of energy dissipation for different breakwater based on computational fluid. *CFD Letters*, 16(1), 22-24. <https://doi.org/10.37934/cfdl.16.1.2242>
14. Sun, H., Bai, J., Ding, W., Zhao, X., & Fan, Y. (2024). Numerical simulation on hydrodynamic performance of perforated caisson breakwater with slotted shoreward wall. *Ocean Eng.*, 299, 117294. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117294>
15. Isaacson, M., Premasiri, S., & Yang, G. (1998). Wave interactions with vertical slotted barrier. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 124, 118-126. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1998\)124:3\(118\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1998)124:3(118))
16. Poguluri, S. K., & Cho, I. H. (2021). Wave dissipation over a horizontal slotted plate with a leeside vertical seawall: analytical and numerical approaches. *Coastal Eng.*, 63(1), 52-67. <https://doi.org/10.1080/21664250.2020.1850396>
17. Grone, J., & Kohlhasse, S. (1974). Wave transmission through vertical slotted walls. Proc., 14th Coast. Eng. Conf., ASCE, 3, 1906-1923.
18. Urashima, S., Ishizuka, K., & Kondo, H. (1986). Energy dissipation and wave force at slotted wall. Proc., 20th Coast. Eng. Conf., ASCE, 3, 2344-2352.
19. Kriebel, D. L. (1992). Vertical wave barriers: Wave transmission and wave forces. 23rd Int. Conf. on Coastal Eng., ASCE, 2, 1313-1326.
20. Muttray, M., & Oumeraci, H. (2002). Wave transformation at sloping perforated walls. In *Solving Coastal Conundrums*; Institution of Civil Engineers: London, UK, 247.
21. Mallayachari, V., & Sundar, V. (1994). Reflection characteristics of permeable seawalls. *Coast. Eng.*, 23, 135-150. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)90019-1](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)90019-1)
22. Alkhalidi, M., Alanjari, N., & Neelamani, S. (2020). Wave Interaction with single and twin vertical and sloped slotted walls. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8, 589-1-23. <https://doi.org/10.3390/jmse8080589>
23. Jun, L., Gao, L., & Jianbo, L. (2012). Short-crested waves interaction with a concentric cylindrical structure with double-layered perforated walls. *Ocean Eng.*, 40, 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.12.011>
24. Mohammadbagheri, J., Salimi, F., & Rahbani, M. (2019). Applying finite difference method to simulate the performance of a perforated breakwater under regular waves. *J. Mar. Sci. Appl.*, 3, 314-324. <https://doi.org/10.1007/s11804-019-00095-5>
25. Venkateswarlu, V., & Karmakar, D. (2019). Numerical investigation on the wave dissipating performance due to multiple porous structures. *ISH J. Hydraul. Eng.*, 3, 314-324. <https://doi.org/10.1080/09715010.2019.1615393>
26. Liu, P. L., & Abbaspour, M. (1982). Wave scattering by a rigid thin barrier. *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Div.*, 108(4), 479-491. <https://doi.org/10.1061/JWPCDX.0000319>
27. Lopez, I., Rosa-Santos, P., Moreira, C. & Taveira-Pinto, F. (2018). RANS-VOF modelling of the hydraulic performance of the LOWREB caisson. *Coastal Eng.*, 140, 161-174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.07.006>
28. Jalon, M. L., Lira-Loarca, A., Baquerizo, A., & Losada M. A. (2019). An analytical model for oblique wave interaction with a partially reflective harbor structure. *Coastal Eng.*, 143, 38-49. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.10.015>
29. Qiao, W., Wang, K.-H., Duan, W., & Sun, Y. (2018). Analytical model of wave loads and motion responses for a floating breakwater system with attached dual porous side walls. *J. Math. Prob. Eng.*, 14, 1-14. <https://doi.org/10.1155/2018/1295986>



30. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91008-6_3)
31. Voskoboinick, V., Kornev, N., & Turnow, 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>
32. 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>
33. 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>
34. Voskoboinick, V. A., Voskoboinick, A. V., Areshkovych, O. O., & Voskoboinyk, O. A. (2016). Pressure fluctuations on the scour surface before prismatic pier. Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016. Oxford, UK, 905-910. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-115>
35. Voskoboinick, V., Onyshchenko, A., Voskoboinyk, O., Makarenkova, A., & Voskoboinyk, 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>
36. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-50302-4_3)
37. Voskoboinyk, A. V., Voskoboinick, V. A., Voskoboinyk, O. A., Tereshchenko, L. M., & Khizha, I. A. (2016). Feature of the vortex and the jet flows around and inside the three-row pile group. Proc. 8<sup>th</sup> International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2016) 12-15 September 2016. Oxford, UK, 897-903. <https://doi.org/10.1201/9781315375045-114>
38. 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](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_1)
39. 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>
40. Pan, X., Wu, D., Liang, B., & Wu, G. (2024). A sectional method to estimate the transmission coefficients of a new type pile-supported permeable breakwater. *Phys. Fluids*, 36, 032127. <https://doi.org/10.1063/5.0200111>
41. Sathyanarayana, A. H., Suvarna, P. S., Umesh P., & Shirlal, K. G. (2024). Investigation on innovative pile head breakwater for coastal protection. *Proc IMechE Part M: J Eng. for the Maritime Environ.*, 238(1), 37-56. <https://doi.org/10.1177/14750902231155677>
42. Reddy, M. S., & Neelamani, S. (1992). Wave transmission and reflection characteristics of a partially immersed rigid vertical barrier. *Ocean Eng.*, 19(3), 313-325. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90032-Y](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90032-Y)

Стаття надійшла до редакції 15.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.09.2024

The article was received 15.05.2024 and was accepted after revision 09.09.2024

**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

**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

**Харченко Анатолій Григорович**

головний інженер-електрик 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/0000-0002-5832-7714> **e-mail:** kharchenko62@gmail.com

**Воскобійник Андрій Володимирович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу гідробіоніки та керування примежовим шаром Інституту гідромеханіки НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8045-8625> **e-mail:** andrew.vsk@gmail.com

УДК 004.7

**Mykola Khudyntsev**, Candidate of Physical and Mathematic Science, Associated Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9324-6901> **e-mail:** [nh@te.net.ua](mailto:nh@te.net.ua)

**Igor Palazhchenko**, postgraduate  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0491-7068> **e-mail:** [palazhchenko.ihor@gmail.com](mailto:palazhchenko.ihor@gmail.com)

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

## CYBERSECURITY MATURITY MODELS FOR CYBERSECURITY ASSESSMENT IN CRITICAL INFRASTRUCTURE

**Abstract.** *The paper includes a list of existing maturity models (cybersecurity maturity) and an analysis of the application of these models for assessing cybersecurity, the level, and maturity of cyber security, the maturity of systems and processes for ensuring cybersecurity in critical infrastructure sectors, in the national cybersecurity system, the development of indicators and indices of the state of security (network, information security, cybersecurity).*

*The paper substantiates and proposes a hierarchy of models for assessing the maturity of cyber security in the national cyber security ecosystem (in the national cyber security system, critical infrastructure, particularly the fuel and energy sector). The investigation's main goal is to intensify the implementation of existing assessment models using multi-level cyber security assessment models (cybersecurity maturity), accumulating statistical data on cyber incidents, cyber-attacks, and countermeasures for further use in predictive analysis and modeling.*

*The tasks of the research are the analysis, comparative analysis of existing models for evaluating the maturity of cyber security, formulation of evaluation models using indicators of cyber security and maturity of cyber security defined by existing normative documents, as well as in the construction of a hierarchy of models for evaluating cyber security in the national system of cyber security, critical infrastructure, fuel and energy sector; development of methodological bases for assessment using cyber security indices. A draft of the methodology for assessing the cyber security of electrical networks, suitable for use in critical infrastructure, has been developed.*

**Keywords:** *information security; cyber security; maturity models; indicators of cybersecurity maturity.*

---

© М.М. Худинцев, І.І. Палажченко, 2024

М.М. Худинцев, І.Л. Палажченко

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

## МОДЕЛІ ЗРІЛОСТІ КІБЕРБЕЗПЕКИ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ КІБЕРБЕЗПЕКИ У КРИТИЧНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

***Анотація.** Робота містить перелік існуючих моделей зрілості (зрілості кібербезпеки) та аналіз застосування цих моделей для оцінювання кібербезпеки, рівня, зрілості кібербезпеки, зрілості систем і процесів забезпечення кібербезпеки у секторах критичної інфраструктури, в національній системі кібербезпеки, розробки індикаторів та індексів стану безпеки (мережевої, інформаційної безпеки, кібербезпеки).*

*У роботі обґрунтована та запропонована ієрархія моделей оцінювання зрілості кібербезпеки в національній екосистемі кібербезпеки (національній системі кібербезпеки, критичній інфраструктурі, зокрема, паливно-енергетичному секторі). Основною метою дослідження є активізація впровадження існуючих моделей оцінювання за допомогою різномірних моделей оцінювання кібербезпеки (зрілості кібербезпеки), накопичення статистичних даних щодо кіберінцидентів, кібератак, заходів протидії для подальшого використання цих даних у прогностичному аналізі та моделюванні.*

*Завдання дослідження полягають у аналізі, порівняльному аналізі існуючих моделей оцінювання зрілості кібербезпеки, формулюванні моделей оцінювання з використанням показників кібербезпеки та зрілості кібербезпеки, визначених існуючими нормативними документами, а також в побудові ієрархії моделей оцінювання кібербезпеки у національній системі кібербезпеки, критичній інфраструктурі, паливно-енергетичному секторі, розробці методологічних основ оцінювання за допомогою індексів кібербезпеки. Розроблено проєкт методики оцінювання кібербезпеки електричних мереж, придатний для використання у критичній інфраструктурі.*

***Ключові слова:** інформаційна безпека; кібербезпека; моделі зрілості; індикатори зрілості кібербезпеки.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.122-134>

### Вступ

Сфера кібербезпеки (забезпечення кібербезпеки) України складалась протягом останніх 10-15 років, сфера функціонування та захисту критичної інфраструктури та її об'єктів – останніх 5-10 років. Після прийняття у 2016 році Стратегії кібербезпеки України [1], а в 2017 та 2021 роках, відповідно, законів України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» [2] та «Про критичну інфраструктуру» [3] розпочався планомірний розвиток цих сфер з нормативних, організаційних та технічних питань. Протягом 2016-2022 років в Україні прийнято близько 50 нормативних документів різного рівня у сферах кібербезпеки та критичної інфраструктури. Склалася практика використання стандартів Європейського інституту телекомунікаційних стандартів (ETSI), Національного інституту стандартів і технологій (NIST), Північноамериканської корпорації з електричної надійності (NERC), Асоціації аудиту і контролю інформаційних систем (ISACA). Профіль

застосування положень нормативної та розпорядчої документації визначається кожним суб'єктом забезпечення кібербезпеки відповідно до вимог національного законодавства (неваріативна складова профілю) та кращих фахових практик (варіативна складова профілю).

У 2016-2022 роках в Україні також прийнято низку нормативних документів у сфері критичної інфраструктури, зокрема: укази Президента України, що вводили у дію рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про удосконалення заходів забезпечення захисту об'єктів критичної інфраструктури» (2016), «Про невідкладні заходи з нейтралізації загроз енергетичній безпеці України та посилення захисту критичної інфраструктури» (2017), постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку формування переліку інформаційно-телекомунікаційних систем об'єктів критичної інфраструктури держави» (2016), «Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури» [4], «Деякі питання об'єктів критичної інформаційної інфраструктури» (2020) [5], методичні рекомендації щодо підвищення рівня кіберзахисту критичної інформаційної інфраструктури (2021) [6], інші нормативні документи окремих державних органів з питань захисту галузевої інформаційної інфраструктури.

До основних нормативних документів у сферах інформаційної безпеки, кібербезпеки та кіберзахисту, окрім зазначених вище, належать: Закон України «Про ратифікацію Конвенції про кіберзлочинність (2005), укази Президента України, що вводили у дію рішення Ради національної безпеки і оборони України «Про Національний координаційний центр кібербезпеки» (2016), «Про загрози кібербезпеці держави та невідкладні заходи з їх нейтралізації» (2017), постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури» (2019) [7], «Про затвердження Порядку проведення огляду стану кіберзахисту критичної інформаційної інфраструктури, державних інформаційних ресурсів та інформації, вимога щодо захисту якої встановлена законом», «Деякі питання забезпечення функціонування системи виявлення вразливостей і реагування на кіберінциденти та кібератаки» (2020), «Про затвердження Положення про організаційно-технічну модель кіберзахисту» (2021) [8], Стратегію кібербезпеки України в новій редакції (2021) [9].

Завданням С.3-19 Стратегії кібербезпеки України [9] передбачено розробити методику збору кіберстатистики та щороку оприлюднювати статистичну інформацію щодо кібератак, кіберінцидентів та заходів протидії за сферами відповідальності основних суб'єктів національної системи кібербезпеки на їх офіційних сайтах. Дані кіберстатистики (статистична інформація щодо кібератак, кіберінцидентів та заходів протидії) включають інформацію стосовно оцінювання кібербезпеки основних суб'єктів національної системи кібербезпеки, секторальних органів у сфері захисту критичної інфраструктури, міністерств та інших центральних органів виконавчої влади, інших державних органів, установ та організацій, інших юридичних осіб.

Відкрита російська військова агресія (2022-2023 рр.) призвела до поглиблення існуючих та появи нових викликів, загроз та інших чинників, які впливають на стан та розвиток сфери безпеки та кібербезпеки секторів критичної інфраструктури. Зокрема, зареєстровано значне збільшення кількості кібератак на державну, енергетичну та банківську інфраструктуру [10],

надзвичайної актуальності набрало питання збереження та відновлення паливно-енергетичного комплексу України [11-13]. Практично усі нормативні документи містять проблематику формування показників (індикаторів) кібербезпеки та її оцінювання, але питання оцінювання зрілості кібербезпеки практично не розглядається.

Проблема оцінювання кібербезпеки, зрілості кібербезпеки, зрілості систем і процесів у секторах критичної інфраструктури, в національній системі кібербезпеки, розробки індикаторів, індексів стану безпеки (мережевої, інформаційної безпеки, кібербезпеки, зрілості безпеки) є актуальною та далекою від остаточного вирішення [14-17].

Оцінювання зазначених показників має здійснюватися на підставі застосування індикаторів високого рівня та індексів (рейтингів) кібербезпеки [18], які свідчать про розвиток сил, заходів та засобів кібербезпеки.

Моделі оцінки і індексації кібербезпеки, проблема оцінки і індексації організаційних і технічних показників стану безпеки і кібербезпеки в критичній інфраструктурі розглядалися також у роботах О. Суходолі, Ю. Харазішвілі, Д. Бобро, А. Сменковського, Г. Рябцева, С. Завгородньої, О. Павленко, А. Антоненко та інших [19-24]. В 2022-2023 роках прийнято низку нормативних документів із зазначених питань [6, 25-28].

У той же час проблема оцінювання зрілості кібербезпеки, як наступний етап розвитку складних інформаційних систем та інформаційного суспільства в цілому, не отримала в Україні необхідного рівня дослідження та нормативного забезпечення. Оцінювання зрілості кібербезпеки є важливим елементом загального аналізу кібербезпеки та актуальною задачею у інформаційній сфері з використанням інформаційно-комунікаційних технологій.

## **Показники, індикатори та ієрархія моделей для оцінювання зрілості кібербезпеки в критичній інфраструктурі**

Оцінку зрілості кібербезпеки пропонується виконувати на підставі моделей, побудованих для наборів показників (індикаторів), визначених прийнятими в Україні нормативними документами, а саме:

- модель заходів кіберзахисту «1176» [29];
- модель заходів кіберзахисту «601» [6];
- модель заходів кіберзахисту «463» [26];
- модель заходів кіберзахисту «417» [27];
- модель заходів кіберзахисту «375» [28];
- модель оцінки зрілості кібербезпеки електричних мереж «908» [25],

а також узагальнююча модель індексування LCSI [18].

В рамках зазначених моделей проведення оцінювання здійснюється по  $N_D$  доменах (логічних областях оцінювання) і  $N_I$  показниках (параметрах, індикаторах) за  $N_L$  рівнями зрілості, в окремих випадках – ще по  $N_{SD}$  піддоменах (субдоменах) або *objectives*. Кількісні характеристики наборів параметрів деяких з розглянутих моделей наведені у Таблиці 1.

Рівень складності моделі, в цілому, підвищується в залежності від кількості показників  $N_I$ .

Показники моделей, як правило, групуються у домени і піддомени (логічні області, класи, категорії, підкатегорії або інші угруповання).

Таблиця 1. Набори параметрів моделей для оцінювання зрілості кібербезпеки

Модель	Abbr.	$N_D$	$N_{SD}$	$N_I$	$N_L$
Cybersecurity Capability Maturity Model, version 2.1	C2M2	10	43	356	4
Smart Grid Maturity Model, version 1.2	SGMM	8	40	178	6
Порядок проведення огляду стану кіберзахисту КІІ, ДІР, ІВЗВЗ	«1176»	6		29	2
Методичні рекомендації щодо підвищення рівня КЗ КІІ	«601»	5	23	108	4
Методичні рекомендації щодо забезпечення КЗ АСУ ТП	«463»	2	23	107	5
Вимоги з КБ ПЕС КІ	«417»	5	23	102	4
Порядок огляду стану КБ ПЕС КІ	«375»	13			2
Методика оцінки зрілості КБ електричних мереж	«908»	10	43	356	4
Локальний індекс кібербезпеки	LCSI	3	82	503	2

Головним показником моделі (моделі зрілості кібербезпеки, моделі заходів кіберзахисту) є рівень зрілості (кібербезпеки, заходу кіберзахисту). Рівні зрілості є обов'язковими показниками моделі та визначаються для усіх інших показників моделі. Етапність впровадження заходів кіберзахисту є необов'язковим показником моделі.

Індикатор моделі – значення показника (параметра), визначеного в рамках прийнятої моделі. Індикатори моделей мають чисельний вигляд або вигляд твердження (яке позначається текстом, умовним за змістом, наприклад, С1, MIL2, f.4 і т.п.).

Індекс моделі – інтегральний (усереднений за визначеною процедурою) індикатор моделі у випадку, коли усі індикатори моделі мають чисельний вигляд.

Якщо індикатор моделі не має чисельного вигляду, до нього може бути застосовано процедуру чисельної індикації. Під чисельною індикацією будемо розуміти визначення відповідності чисельного значення (балу або ваги) до індикатора, який має вигляд твердження. Алгоритм визначення відповідності визначається в рамках моделі.

У випадку, коли показники моделі оцінюються по двобальній системі, відповідні індикатори приймають значення:

- «1» – показник відповідає запропонованому твердженню;
- «0» – показник не відповідає запропонованому твердженню.

У інших випадках індикатори розраховуються за формулами, які визначаються в рамках відповідної моделі.

Оцінювання показників моделі здійснюється шляхом визначення (встановлення) відповідності:

- показнику моделі відповідає індикатор моделі у вигляді твердження;
- показнику моделі відповідає індикатор моделі у чисельному вигляді;
- показнику моделі відповідає індикатор моделі у вигляді твердження, до якого застосовано процедуру чисельної індикації.

У англійській літературі показники і індикатори не розрізняються (використовується *indicators*).

Індекси кібербезпеки є узагальнюючими індикаторами («індикаторами індикаторів» або індикаторами 2-го рівня) та формуються (розраховуються) згідно з власною методологією.

За способом формування індекси кібербезпеки поділяються на синтетичні, аналітичні та автоматичні.

Синтетичні індекси кібербезпеки формуються в рамках моделей (фреймворків, усталених практик) оцінювання кібербезпеки (зрілості кібербезпеки), аналітичні – в рамках виключно аналітичних моделей (методологічних підходів) із застосуванням методу експертного оцінювання, автоматичні (в першу чергу, мережеві індекси кібербезпеки) – шляхом автоматичного збору та обробки інформації про інциденти, індикатори компрометації, загрози та ризики, як правило, технічного характеру.

Історично і методологічно моделі оцінювання кібербезпеки поділяються на моделі заходів кіберзахисту (МЗКЗ) та моделі зрілості кібербезпеки (МЗКБ). Ключовим критерієм моделі оцінювання кібербезпеки є вимірюваність показників МЗКЗ. Пропонується також додати до переліку цих моделей моделі індексів кібербезпеки (МІКБ): моделі синтетичних індексів кібербезпеки є розвитком моделей оцінювання кібербезпеки, моделі аналітичних та автоматичних індексів кібербезпеки на практиці застосовуються окремо (див. Рис. 1).

Основою методологічного підходу застосування індексів кібербезпеки має бути узгоджене оцінювання кібербезпеки (зрілості кібербезпеки) в рамках підходів, які використовують усі моделі синтетичних, аналітичних та автоматичних індексів кібербезпеки.

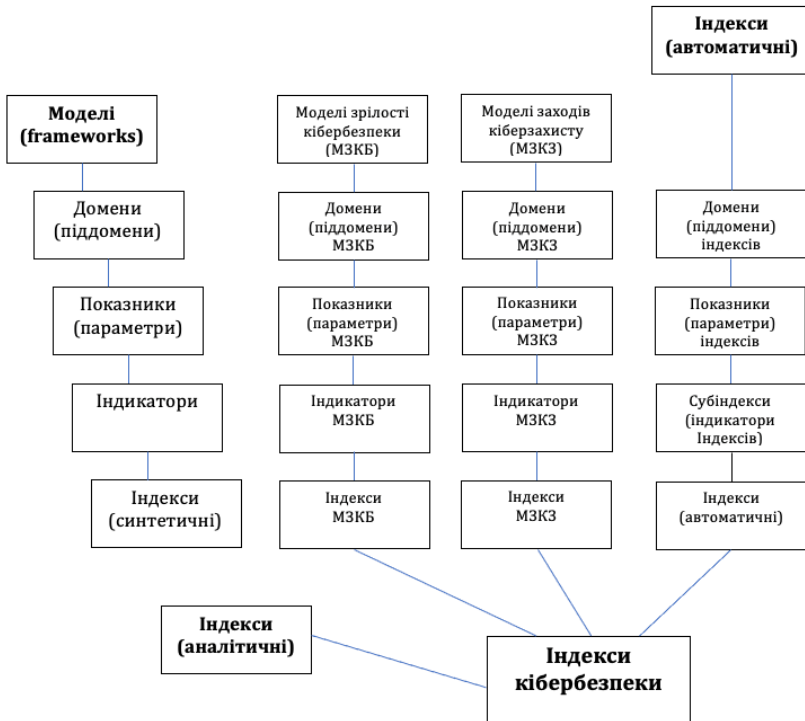


Рис. 1. Моделі оцінювання кібербезпеки (зрілості кібербезпеки)



### *Проведення оцінювання зрілості кібербезпеки*

Проведення оцінювання зрілості кібербезпеки у критичній інфраструктурі, національній системі кібербезпеки, окремих суб'єктів забезпечення кібербезпеки має визначатися нормативно-правовим актом у встановленому порядку.

Методологічною основою для оцінювання є застосування відповідних запропонованих моделей. Процедура оцінювання має визначатися методикою оцінювання кібербезпеки або зрілості кібербезпеки.

Цільова група користувачів даних результатів оцінювання зрілості кібербезпеки в Україні має складатися з:

- Президента України (через робочий орган Ради національної безпеки і оборони – Національний координаційний центр кібербезпеки);
- державного органу, який призначений для формування та реалізації державної політики у сфері кіберзахисту;
- уповноваженого органу у сфері захисту критичної інфраструктури;
- секторальних органів у сфері захисту критичної інфраструктури.

Також до цільової групи можуть входити Верховна Рада України та Кабінет Міністрів України.

Форми оцінювання зрілості кібербезпеки:

- самооцінювання (суб'єктом оцінювання є власник або розпорядник об'єкта оцінювання);
- експертне оцінювання (суб'єктом оцінювання є особа, уповноважена на проведення оцінювання об'єкта оцінювання);
- індексування (суб'єкти оцінювання належать до цільової групи користувачів даних результатів оцінювання).

Оцінювання зрілості кібербезпеки здійснюється шляхом визначення (розрахунку, встановлення, формування) оцінки (індексу моделі) або профілю результатів оцінювання.

Профіль результатів оцінювання – це набір зафіксованих в результаті оцінювання індикаторів підходу або моделі. Профіль результатів оцінювання застосовується, якщо індикатори не мають чисельного вигляду.

Оцінка (індекс) – це усереднений за визначеною процедурою індикатор підходу або моделі у випадку, коли усі індикатори мають чисельний вигляд. Оцінка застосовується, якщо індикатори мають чисельний вигляд. Оцінка називається простою (зваженою) у випадку, коли ваги окремих індикаторів дорівнюють (відрізняються від) 0 або 1.

Визначення (розрахунок, формування) оцінки або профілю результатів оцінювання має відбуватися для кожного домену (піддомену) окремо і в цілому – для моделі.

Послідовність дій з оцінювання зрілості кібербезпеки:

1. Прийняття рішення про проведення оцінювання суб'єктом оцінювання.
2. Формування підстав та вихідних даних для проведення оцінювання.
3. Проведення оцінювання.
4. Формування звіту по результатах оцінювання.

Оцінювання має здійснюватися по мірі необхідності, але у будь-якому випадку – на регулярній основі не рідше 1 разу на рік.

Дані результатів оцінювання є адміністративними даними та даними кіберстатистики. Завдання з розроблення методики збору кіберстатистики та щорічного оприлюднення статистичної інформації щодо кібератак, кіберінцидентів та заходів протидії за сферами відповідальності основних суб'єктів національної системи кібербезпеки на їх офіційних вебсайтах визначено Стратегією кібербезпеки України (ціль С.3 абз.5).

Поводження з даними результатів оцінювання, захист цих даних має здійснюватися у відповідності до законодавства України.

Перегляд методики, показників та індикаторів оцінювання зрілості має здійснюватися за потребою, але не рідше ніж 1 раз на 2 роки.

## **Висновки**

Запропоновані підходи та моделі оцінювання мають застосовуватися у залежності від рівня розвитку сил, засобів і заходів забезпечення кібербезпеки або кіберзахисту.

Проведено аналіз існуючих моделей оцінювання зрілості кібербезпеки, сформульовані моделі оцінювання з використанням показників кібербезпеки та зрілості кібербезпеки, визначених існуючими нормативними документами. Визначено ієрархію моделей оцінювання з урахуванням складу та кількості показників різних моделей оцінювання для національної системи кібербезпеки та секторів критичної інфраструктури. Запропоновано використання індексів кібербезпеки для індексування моделей оцінювання зрілості.

Відповідний аналіз та пропозиції застосовано для опису та впровадження процедури оцінювання зрілості кібербезпеки електричних мереж України. За основу було взято підходи, використані у моделі С2М2, з використанням також інших моделей оцінювання з показниками, визначеними існуючими нормативними документами. Розроблені методологічні основи та проект методики оцінки зрілості кібербезпеки електричних мереж.

Завдання з розробки методики оцінки зрілості кібербезпеки електричних мереж України визначено Концепцією впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року та планом її реалізації. Дослідження та отримання науково-практичного результату здійснюються в рамках Другого проекту передачі електроенергії, компонент 3 «Консультаційні послуги із запровадження системи оцінювання зрілості кібербезпеки в енергетичній системі України» (Позика № 8462-UA Світового банку).

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Стратегія кібербезпеки України (2016). Президент України. Указ від 15.03.2016 № 96/2016. Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/962016-19836>.
2. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України (2017). Верховна Рада України. Закон України від 05.10.2017 № 2163-VIII. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>.
3. Про критичну інфраструктуру (2021). Верховна Рада України. Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>.
4. Деякі питання об'єктів критичної інфраструктури (2020). Кабінет Міністрів України. Постанова від 09.10.2020 № 1109. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>.

5. Деякі питання об'єктів критичної інформаційної інфраструктури (2020). Кабінет Міністрів України. Постанова від 09.10.2020 № 943. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/943-2020-%D0%BF#Text>.
6. Методичні рекомендації щодо підвищення рівня кіберзахисту критичної інформаційної інфраструктури (2021). Адміністрація Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України. Наказ від 06.11.2021 № 601. Retrieved from <https://cip.gov.ua/ua/news/nakaz-ad-2021-10-06-601>.
7. Про затвердження Загальних вимог до кіберзахисту об'єктів критичної інфраструктури (2019). Кабінет Міністрів України. Постанова від 19.06.2019 № 518. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF#Text>.
8. Про затвердження Положення про організаційно-технічну модель кіберзахисту (2021). Кабінет Міністрів України. Постанова від 29.12.2021 № 1426. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1426-2021-%D0%BF#Text>.
9. Стратегія кібербезпеки України (2021). Президент України. Указ від 26.08.2021 № 447/20. Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/4472021-40013>.
10. Кількість кібератак на енергетичну інфраструктуру з початку війни зросла на третину – Міненерго (2022). А. Жарікова. Листопад, 21, 2022. Київ. Retrieved from <https://www.epravda.com.ua/news/2022/11/21/694084/>.
11. Кібербезпека та стійкість об'єктів енергетики в суспільстві та державі в нормальних, критичних та аварійних умовах (2022). ІПМЕ. Енергетична криза & Кібербезпека, Н2020 Електронний міжнародний захід, Баку, Азербайджан, 05-07.12.2022. Retrieved from <https://electron-project.eu/blog/cybersecurity-and-sustainability-of-energy-sector-facilities-in-society-and-the-state-in-normal-critical-and-emergency-circumstances/#>.
12. Д. Евенсен, Б. Совакул, Н. Далтон, К. Глебова (2022). Енергетична безпека, зміна клімату та майбутня відбудова України. Інститут глобального сталого розвитку Бостонського університету, Бостон, Массачусетс, США. 20 с. – Retrieved from <https://www.bu.edu/igs/2022/10/20/energy-security-climate-change-and-the-future-of-ukraine-reconstruction/>.
13. Кібербезпека в енергетичному секторі: які виклики стоять перед об'єктами критичної інфраструктури України? (2022). Ф. Сафаров, Є. Владіміров, С. Бракко, О. Харковина, Д. Дзядек. Energy Security Forum: Післявоєнне відновлення енергетичного сектору України, 21-25.11.2022, Київ. Retrieved from <https://iclub.energy/energysecurityforum2022#!/tab/505198962-1>.
14. Розробка концептуальних засад і науково-методичної бази оцінювання стану кібербезпеки та рівня захищеності інформаційних активів та ресурсів суб'єктів забезпечення кібербезпеки України (2021). Реєстраційна картка НДДКР 0121U112396, дата реєстрації: 29-07-2021, Громадська організація «Міжнародний університет кібербезпеки».
15. Розроблення переліку, методики оброблення для публікацій статистичних даних про кіберінциденти/кібератаки (2023). Реєстраційна картка НДДКР 0123U102272, дата реєстрації: 19-04-2023, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова Національної академії наук України.
16. М.М. Худинцев (2023). Концептуальні положення забезпечення кібербезпеки енергетичної галузі України, ISSN 0204–3572. Електрон. моделювання. Т. 45. № 1, С. 80-97. Retrieved from <https://www.emodel.org.ua/images/em/45-1/45-1-6.pdf>.
17. Khudyntsev, M., Lebid, O., Bychenok, M., Zhylin, A., Davydiuk, A. (2023). Network Monitoring Index in the Information Security Management System of Critical Information Infrastructure Objects. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 809. Springer, Cham. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_17).

18. Худинцев М.М. (2021). Світові індекси кібербезпеки: огляд та методики формування (Глобальний звіт / Каталог) / М.М. Худинцев, А.В. Жилін, А.В. Давидок. – Київ: Міжнародний університет кібербезпеки, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. ISBN 978-966-136-887-2. 240 с.
19. Суходоля О.М. (2020). Енергетична безпека України: методологія системного аналізу та стратегічного планування : аналіт. доп. / О.М. Суходоля, Ю.М. Харазішвілі, Д.Г. Бобро, А.Ю. Сменковський, Г.Л. Рябцев, С.П. Завгородня. Київ : НІСД. 178 с.
20. Суходоля О.М. (2021). Визначення рівня енергетичної безпеки України : аналіт. доп. / О.М. Суходоля, Ю.М. Харазішвілі, Д.Г. Бобро, А.Ю. Сменковський, Г.Л. Рябцев, С.П. Завгородня. Київ : НІСД. 71 с.
21. Суходоля О. (2022). Оцінка стійкості енергетичної інфраструктури України : аналіт. звіт / О. Павленко, А. Антоненко, Р. Ніцович, С. Євтушок, О. Суходоля. Київ : ГО «Діксі Груп». 72 с.
22. Гулак Г.М. (2021). Методологічні засади створення та функціонування центру кібербезпеки інформаційної інфраструктури об'єктів ядерної енергетики / Г.М. Гулак, І.С. Скітер, Є.Г. Гулак // Електронне фахове наукове видання “Кібербезпека: освіта, наука, техніка”. Вип. 4(12). С. 172-186.
23. Кібербезпека енергетики, Науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України : запрошення, програма та матеріали, 28 травня 2021 р. (2021). Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 61 с.
24. Кібербезпека енергетики, Науково-практична конференція Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова Національної академії наук України : запрошення, програма та матеріали, 27 травня 2022 р. (2022). Київ : ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 128 с.
25. Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року (2022). Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 14 жовтня 2022 р. № 908-р. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text>.
26. Методичні рекомендації щодо забезпечення кіберзахисту автоматизованих систем управління технологічними процесами (2023). Адміністрація Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України. Наказ від 29.05.2023 № 463. Retrieved from <https://cip.gov.ua/ua/news/nakaz-administraciyi-derzhspeczv-yazku-vid-29-05-2023-463-pro-zatverdzhennya-metodichnikh-rekomendacii-shodo-zabezpechennya-kiberzakhistu-avtomatizovanikh-sistem-upravlinnya-tekhnologichnimi-procesami>.
27. Вимоги з кібербезпеки паливно-енергетичного сектору критичної інфраструктури (2022). Міністерство енергетики України. – Наказ від 15.12.2022 № 417. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0249-23#Text>.
28. Порядок огляду стану кібербезпеки паливно-енергетичного сектору критичної інфраструктури (2023). Міністерство енергетики України, КЕП (підписання) Галущенко Г.В. Наказ від 16.01.2023. Retrieved from <https://mev.gov.ua/sites/default/files/2023-01/%D0%9D%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%B7%20%D0%9F%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%BA%20%281%29.pdf>.
29. Порядок проведення огляду стану кіберзахисту критичної інформаційної інфраструктури, державних інформаційних ресурсів та інформації, вимога щодо захисту якої встановлена законом, Кабінет Міністрів України, Постанова від 11.11.2020 № 1176.

*Стаття надійшла до редакції 23.08.2024 і прийнята до друку після рецензування 20.11.2024*

## REFERENCES

1. Cybersecurity Strategy of Ukraine (2016). President of Ukraine. Decree of 15.03.2016 No. 96/2016. Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/962016-19836>
2. On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity of Ukraine (2017). Verkhovna Rada of Ukraine. Law of Ukraine of 05.10.2017 No. 2163-VIII. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>
3. On Critical Infrastructure (2021). Verkhovna Rada of Ukraine. Law of Ukraine of 16.11.2021 No. 1882-IX. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text>
4. Some issues of critical infrastructure facilities (2020). Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution of 09.10.2020 No. 1109. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1109-2020-%D0%BF#Text>
5. Some issues of critical information infrastructure facilities (2020). Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution of 09.10.2020 No. 943. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/943-2020-%D0%BF#Text>
6. Methodological recommendations for increasing the level of cyber protection of critical information infrastructure (2021). Administration of the State Service for Special Communications and Information Protection of Ukraine. Order dated 06.11.2021 No. 601. Retrieved from <https://cip.gov.ua/ua/news/nakaz-ad-2021-10-06-601>
7. On Approval of General Requirements for Cybersecurity of Critical Infrastructure Facilities (2019). Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution dated 19.06.2019 No. 518. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/518-2019-%D0%BF#Text>
8. On approval of the Regulation on the organizational and technical model of cyber defense (2021). Cabinet of Ministers of Ukraine. Resolution of 29.12.2021 No. 1426. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1426-2021-%D0%BF#Text>
9. Cybersecurity Strategy of Ukraine (2021). President of Ukraine. Decree of 26.08.2021 No. 447/20. Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/4472021-40013>
10. Zharikova, A. (November, 21, 2022). The number of cyberattacks on energy infrastructure has increased by a third since the beginning of the war – Ministry of Energy. Kyiv. Retrieved from <https://www.epravda.com.ua/news/2022/11/21/694084/>
11. Cybersecurity and Sustainability of Energy Sector Facilities in Society and the State in Normal, Critical and Emergency Circumstances (2022). IPME. Energy Crisis & Cybersecurity, H2020 Electronic International Event, Baku, Azerbaijan, 05-07.12.2022. Retrieved from <https://electron-project.eu/blog/cybersecurity-and-sustainability-of-energy-sector-facilities-in-society-and-the-state-in-normal-critical-and-emergency-circumstances/#>
12. Evensen, D., Sovakul, B., Dalton, N., Glebova, K. (2022). Energy Security, Climate Change and the Future Reconstruction of Ukraine. Institute for Global Sustainability, Boston University, Boston, Massachusetts, USA. 20 p. Retrieved from <https://www.bu.edu/igs/2022/10/20/energy-security-climate-change-and-the-future-of-ukraine-reconstruction/>
13. Safarov, F., Vladimirov, E., Brakko, S., Kharkovyna, O., Dzyadek, D. (2022). Cybersecurity in the Energy Sector: What Challenges Face Ukraine's Critical Infrastructure? Energy Security Forum: Postwar Reconstruction of Ukraine's Energy Sector, 21-25.11.2022, Kyiv. Retrieved from <https://iclub.energy/energysecurityforum2022#!/tab/505198962-1>
14. Development of conceptual principles and scientific and methodological basis for assessing the state of cybersecurity and the level of security of information assets and resources of cybersecurity entities of Ukraine (2021). Registration card R&D 0121U112396, registration date: 29-07-2021, Public organization "International University of Cybersecurity".
15. Development of a list, processing methods for publications of statistical data on cyber incidents/cyberattacks (2023). Registration card R&D 0123U102272, registration date: 19-04-2023, Institute of Modeling Problems in Energy named after G. E. Pukhov of the National Academy of Sciences of Ukraine.

16. Khudyntsev, M.M. (2023). Conceptual provisions for ensuring cybersecurity of the energy sector of Ukraine. *Electronic modeling*, 45, 1, 80-97. Retrieved from <https://www.emodel.org.ua/images/em/45-1/45-1-6.pdf>
17. Khudyntsev, M., Lebid, O., Bychenok, M., Zhylin, A., Davydyuk, A. (2023). Network Monitoring Index in the Information Security Management System of Critical Information Infrastructure Objects. In: Dovgyi, S., Trofymchuk, O., Ustimenko, V., Globa, L. (eds) *Information and Communication Technologies and Sustainable Development. ICT&SD 2022. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 809. Springer, Cham. Retrieved from [https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_17)
18. Khudyntsev, M.M., Zhilin, A.V., Davydyuk, A.V. (2021). *World Cybersecurity Indices: Overview and Formation Methods (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.
19. Sukhodolya, O.M., Kharazishvili, Y.M., Bobro, D.G., Smenkovsky, A.Yu., Ryabtsev, G.L., Zavgorodnya, S.P. (2020). *Energy Security of Ukraine: Methodology of System Analysis and Strategic Planning: Analytical Supplement*. Kyiv: NISD.
20. Sukhodolya, O.M. et al. (2021). Determining the level of energy security of Ukraine: analytical supplement. Kyiv: NISD.
21. Sukhodolya, O. et al. (2022). Assessment of the stability of the energy infrastructure of Ukraine: analytical report. Kyiv: NGO "Dixie Group".
22. Gulak, G.M., Skeeter, I.S., Gulak, E.G. (2021). Methodological principles for the creation and functioning of a cybersecurity center for information infrastructure of nuclear power facilities. *"Cybersecurity: education, science, technology"*, 4(12), 172-186.
23. Cybersecurity of energy. (2021). In Scientific and practical conference of the Institute of Modeling Problems in Energy named after G.E. Pukhov of the National Academy of Sciences of Ukraine: invitation, program and materials, May 28, 2021. Kyiv: IPME named after G.E. Pukhov of the National Academy of Sciences of Ukraine.
24. Cybersecurity of energy. (2022). In Scientific and practical conference of the Institute of Modeling Problems in Energy named after G.E. Pukhov of the NASU: invitation, program and materials, May 27, 2022. Kyiv: IPME named after G.E. Pukhov of the NASU.
25. Concepts of implementation of "smart grids" in Ukraine to 2035 (2022). Cabinet of Ministers of Ukraine. Order of October 14, 2022 No. 908-p. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-%D1%80#Text>
26. Methodological recommendations for ensuring cyber protection of automated technological process control systems (2023). Administration of the State Service for Special Communications and Information Protection of Ukraine. Order of 05/29/2023 No. 463. Retrieved from <https://cip.gov.ua/ua/news/nakaz-administraciyi-derzhspeczv-yazku-vid-29-05-2023-463-pro-zatverdzhennya-metodichnikh-rekomendacii-shodo-zabezpechennya-kiberzakhistu-avtomatizovanikh-sistem-upravlinnya-tekhnologichnimi-procesami>
27. Requirements for cybersecurity of the fuel and energy sector of critical infrastructure (2022). Ministry of Energy of Ukraine. Order of 12/15/2022 No. 417. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0249-23#Text>
28. Procedure for reviewing the state of cybersecurity of the fuel and energy sector of critical infrastructure (2023). Ministry of Energy of Ukraine. Order dated 16.01.2023. Retrieved from <https://mev.gov.ua/sites/default/files/2023-01/%D0%9D%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D0%B7%20%D0%9F%D0%BE%D1%80%D1%8F%D0%B4%D0%BE%D0%BA%20%281%29.pdf>
29. Procedure for conducting a review of the state of cyber protection of critical information infrastructure, state information resources and information, the requirement for protection of which is established by law (2020). Cabinet of Ministers of Ukraine, Resolution dated 11.11.2020 No. 1176.

*The article was received 23.08.2024 and was accepted after revision 20.11.2024*

**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](mailto:nh@te.net.ua)

**Палажченко Ігор Леонідович**

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

**Адреса робоча:** 03186, Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-0491-7068> **e-mail:** [palazhchenko.ihor@gmail.com](mailto:palazhchenko.ihor@gmail.com)

УДК 502.51:504.5

**Vasyl Maruschak**, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-9949> **e-mail:** [stydjaga.fo.ru@gmail.com](mailto:stydjaga.fo.ru@gmail.com)

**Taras Volynets**, postgraduate

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9152-4680> **e-mail:** [alhimiktv@ukr.net](mailto:alhimiktv@ukr.net)

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

## **INFORMATION SYSTEMS OF DECIPHERING IMAGES USING AEROSPACE TECHNOLOGIES**

**Abstract.** *The work is devoted to solving a scientific and practical task, which consists in the development of methods, technologies and means of creating an information system for deciphering images using aerospace technologies. Modern aerospace technologies are a tool for obtaining highly accurate data on the state of the environment, natural-technical complexes and infrastructure facilities. In addition, remote sensing of the Earth (DSR) allows to quickly obtain images of the surface of the studied territory at various spatial and spectral levels, which contributes to a more detailed analysis of ecological processes, monitoring of territories, assessment of the consequences of anthropogenic activities and armed conflicts. In the conditions of the rapid development of space technologies, the application of information systems for deciphering satellite and aerial photographs is relevant. The purpose of the work is to decipher the image to obtain an official object of reliable documentary data about the area and the objects located on it. This includes the identification, analysis and interpretation of the received images for the prompt introduction of changes in the territories, assessment of the condition of infrastructure facilities, natural and man-made systems. The obtained data contribute to effective monitoring and decision-making in the areas of environmental management, environmental protection, as well as in situations related to ensuring national security.*

*These systems are based on methods of automatic recognition and visual analysis, which allows to significantly increase the speed and accuracy of identification of objects, changes in the environment and risk forecasting. Cosmosphere and others, opens opportunities for detailed analysis of man-made impacts, identification of ecological threat zones, monitoring of the condition of forest areas, water resources and other key components of the ecosystem.*

**Keywords:** *information technologies, deciphering, satellite and aerial photographs, image interpretation, spectral channels, remote methods, natural and technical complexes, infrastructure objects.*



**В.М. Марущак, Т.В. Волинець**

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

## **ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ДЕШИФРУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ АЕРОКОСМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

***Анотація.** Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання, що полягає в розробці методів, технологій та засобів створення інформаційної системи дешифрування зображень з використанням аерокосмічних технологій. Сучасні аерокосмічні технології є інструментом для отримання високоточних даних про стан навколишнього середовища, природно-технічних комплексів та об'єктів інфраструктури. Крім цього, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє оперативно отримувати зображення поверхні досліджуваної території на різних просторових і спектральних рівнях, що сприяє більш детальному аналізу екологічних процесів, моніторингу територій, оцінці наслідків антропогенної діяльності та збройних конфліктів. В умовах стрімкого розвитку космічних технологій актуальним є застосування інформаційних систем для дешифрування супутникових та аерофотознімків.*

*Метою роботи є здійснення дешифрування зображення для отримання офіційного об'єкта достовірних документальних даних про місцевість та розташовані на ній об'єкти. Це включає ідентифікацію, аналіз та інтерпретацію отриманих зображень для оперативного внесення змін на територіях, оцінки стану об'єктів інфраструктури, природних та техногенних систем. Отримані дані сприяють ефективному моніторингу та прийняттю рішень у сферах екологічного управління, охорони довкілля, а також у ситуаціях, пов'язаних із забезпеченням національної безпеки.*

*Ці системи базуються на методах автоматичного розпізнавання та візуального аналізу, що дозволяє суттєво підвищити швидкість і точність ідентифікації об'єктів, змін у довкіллі та прогнозування ризиків. Використання даних із супутників високої роздільної здатності, таких як Махат, Космосфера та інші, відкриває можливості для детального аналізу техногенних впливів, визначення зон екологічних загроз, відстеження стану лісових масивів, водних ресурсів та інших ключових компонентів екосистеми.*

***Ключові слова:** інформаційні технології, дешифрування, супутникові та аерофотознімки, інтерпретація зображень, спектральні канали, дистанційні методи, природно-технічні комплекси, об'єкти інфраструктури.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.135-144>

### **Вступ**

Сучасні аерокосмічні технології є інструментом для отримання високоточних даних про стан навколишнього середовища, природно-технічних комплексів та об'єктів інфраструктури. Крім цього, дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє оперативно отримувати зображення поверхні досліджуваної території на різних просторових і спектральних рівнях, що сприяє більш детальному аналізу екологічних процесів, моніторингу територій, оцінці наслідків антропогенної діяльності та збройних конфліктів. В умовах стрімкого розвитку космічних технологій особливо актуальним є застосування інформаційних систем для дешифрування супутникових та аерофотознімків.

Ці системи базуються на методах автоматичного розпізнавання та візуального аналізу, що дозволяє суттєво підвищити швидкість і точність ідентифікації об'єктів, змін у довкіллі та прогнозування ризиків. Таким чином, використання даних із супутників високої роздільної здатності, таких як Махаг, Космосфера та інші, відкриває можливості для детального аналізу техногенних впливів, визначення зон екологічних загроз, відстеження стану лісових масивів, водних ресурсів та інших ключових компонентів екосистеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження зосереджені на вдосконаленні методів аналізу вищих спектральних компонентів та мультиспектральних знімків, що дозволяє отримати більш точну інформацію про стан рослинності, водних об'єктів і поверхневих змін. Завдяки такому підходу, на основі аналізу спектральних характеристик, можна більш ефективно ідентифікувати різні типи покриття землі, що є основою для моніторингу екологічного стану в реальності. Останні дослідження в галузевих інформаційних системах для дешифрування зображення з використанням аерокосмічних технологій вказують на суттєвий розвиток методів автоматизованого аналізу даних, що дозволяє підвищити точність і швидкість оцінки як екологічних, так і техногенних процесів. Також підкреслюється важливість інтеграції різноманітних типів даних для забезпечення ефективного управління природними ресурсами та військових цілей. В Україні значний внесок у космічні дослідження зробили: Лялько В.І., який займався спектральними характеристиками рослинного покриття [1, 2]; Попов М.О., який розробляє методи прогнозування врожайності зернових культур на основі багатоспектральних даних ДЗЗ [3]; Трофимчук О.М., Красовський Г.Я. і Греков Л.Д., які займаються космічним моніторингом забруднення земель [4, 5] та інші.

**Метою** роботи є дешифрування та своєчасне одержання документальних даних про місцевість та розташовані на ній об'єкти.

Усі задачі дешифрування можна розділити на дві загальні групи:

- задачі щодо отримання узагальненої інформації про поверхню Землі;
- задачі щодо визначення наявності об'єктів на земній (водній) поверхні Землі.

Перша група задач включає виявлення стану дорожньої мережі, населених пунктів, гідрографії, рослинності й інших елементів тактичних властивостей місцевості.

Друга група задач це – розвідка наземних об'єктів противника, що включає в себе процес виявлення, розпізнавання й інтерпретації розташованих на місцевості об'єктів по їх зображеннях на знімку, а також визначення їх кількісних і якісних характеристик.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

Дешифрування є комплексним процесом, який включає в себе виявлення, розпізнавання та інтерпретацію об'єктів на знімках з метою визначення їх повноцінних і якісних характеристик. На початковому етапі виявлення здійснюється сприйняття об'єкта на зображенні, без розпізнавання його сутності. Це дозволяє розмістити, дешифрувати об'єкт, але не дає можливості відразу зрозуміти, що саме на зображенні. Процес визначення також включає оцінку відношення сигналу/шуму, що дозволяє виділити критерій важливого

елемента. Після виявлення настає етап розпізнавання, коли розглядаються складові ознаки об'єкта, і на основі порівняння з відомими моделями або базами даних визначається його сутність [6]. Тут важливо розмежувати подібні об'єкти і правильно класифікувати їх за характеристиками. Розпізнавання дозволяє встановити, що саме зображено на знімку – наприклад, це може бути конкретний тип рослинного покриття, вид транспорту чи військовий об'єкт.

Методом дешифрування є своєчасне отримання документальних даних про місцевість та її об'єкти, які можуть бути критично важливими для прийняття управлінських рішень. В окремих випадках дешифрування включає правильне розпізнавання і класифікацію об'єктів, визначення їх кількісних характеристик, взаємозв'язків, стану і характеру діяльності.

Для досягнення цих цілей фахівців необхідно виконати кілька важливих вимог до процесу дешифрування. Оперативність обробки знімків забезпечує швидке й ефективне дешифрування зображення, визначення координат об'єктів і підготовку документації у встановлений термін. Своєчасність характеризує виконання робіт у потрібний час, а об'єктивність гарантує достовірність отриманих даних, збереження суб'єктивізму. Повне дешифрування забезпечує детальність характеристик об'єктів, ретельність забезпечує повний огляд всього зображення з певних місцевих умов, що дозволяє уникнути помилок. Вірогідність результатів гарантує точність та коректність інформації, а наочність результатів забезпечує надання даних у зручному вигляді, який може бути усним, письмовим, графічним.

Дешифрування за ступенем своєї складності відноситься до інтелектуальних процесів, виконання яких вважалося прерогативою тільки людини. Однак спроби створення систем штучного інтелекту роблять реальною перспективу виконання дешифрування знімків із застосуванням програмно-технічних комплексів обробки зображень (ПТКОЗ). Виходячи з цього, можна виділити три способи виконання дешифрування:

- 1) **візуальний**, при якому інформація із зображення зчитується зоровим апаратом дешифрувальника і дешифрувальником же аналізується;
- 2) **автоматичний**, при якому процес дешифрування цілком виконується штучною системою – ПТКОЗ;
- 3) **автоматизований**, при якому в процесі дешифрування дешифрувальник користується допомогою ПТКОЗ.

Оскільки більшість знімків є дрібномасштабними і низькоконтрастними, то при візуальному дешифруванні широко застосовуються різні оптичні й оптико-електронні прилади, що дозволяють поліпшити умови розглядання зображень людиною.

Можливості автоматичного дешифрування знімків у даний час активно вивчаються. Вже створені експериментальні зразки системи автоматичного дешифрування, що забезпечують виявлення районів зосередження техніки, інженерного обладнання, злітно-посадкових смуг, розпізнавання літаків, кораблів, полігонів, аеродромів. Дослідження таких зразків показує, що при досить вузькій предметній області системи автоматичного дешифрування можуть забезпечити ефект, порівнянний з результатами візуального дешифрування. Інший підхід полягає у використанні когерентно-оптичних засобів, для яких зображення є природною формою представлення оброблюваних сигналів.

Особливе значення при автоматизованому дешифруванні має програмне забезпечення обробки даних і наявність та характеристики пристроїв уведення/виведення зображень. Однак на всіх етапах обробки – пріоритет у прийнятті рішення належить людині.

Дешифруватися можуть як поодинокі знімки, так і комплекти знімків із зображеннями району зйомки. Якщо при дешифруванні здійснюється порівняння різних зображень, виконаних у різний час, у різних спектральних діапазонах, еталонних тощо, то такий метод дешифрування називається методом порівняння [7].

Якщо є два знімки, що утворюють стереопару, і проводиться аналіз цієї стереопари з дотриманням визначених оптичних умов, то такий метод дешифрування називається стереоскопічним.

**Особливості використання прямих, непрямих дешифрувальних ознак при пошуку об'єктів та визначення їхніх елементів.** Всі об'єкти, розташовані на поверхні Землі, можна класифікувати за різними ознаками. Однак для теорії і практики військового дешифрування найбільше значення має класифікація в залежності від складності і складу об'єктів, що враховує суть пізнавального процесу і підрозділяє їх на прості і складні.

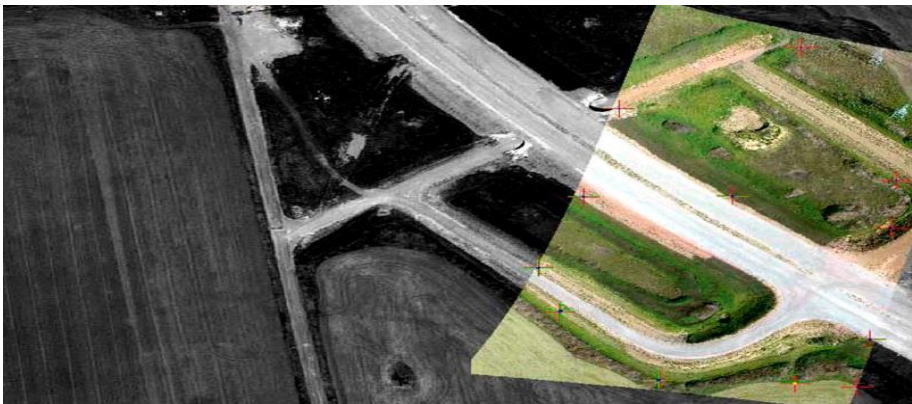


Рис. 1. Прості об'єкти дешифрування

**Простими** об'єктами називаються окремі природні або штучні предмети (споруди, утворення), що знаходяться на земній або водній поверхні і виконують одну визначену функцію (корабель, будинок, перехрестя, дерево, луг) (рис. 1).

**Складними** об'єктами називаються природні або штучні комплекси, що займають значні за розмірами площі, виконують конкретні функції і складаються із сукупності однакових або різних простих об'єктів, що знаходяться у визначеному взаємозв'язку (аеродром, зосередження військ, порт, ділянка місцевості) (рис. 2).

У випадку, коли обробка відео проводиться після приземлення БПЛА, слід періодично робити паузу в перегляді, для більш детального вивчення окремих ділянок кадру. Для цього слід користуватися функцією «Пауза» програмного відеопрограваача для виявлення підозрілих об'єктів, або ж після впевненого виявлення об'єктів слід зробити «скріншот» кадру відеознімання (рис. 3).



Рис. 2. Складні об'єкти дешифрування



Рис. 3. Знімок «скріншот» кадру відеознімання

Під час обробки окремих відеокадрів необхідно дотримуватись обов'язкового правила: роздільна здатність монітору, на якому здійснюється перегляд відео, має бути не меншою, аніж роздільна здатність самого відео. Інакше, буде втрачена детальність зображення, а ймовірність виявлення та розпізнавання зображень об'єктів буде зменшена.

Якщо за прямими розпізнавальними ознаками об'єкт не виявлений, то це не завжди означає, що його на знімку немає. Треба пам'ятати, що як би ретельно не був замаскований об'єкт, на місцевості завжди залишаються сліди діяльності людей і техніки.

Повнота інформації про складний об'єкт, ступінь розкриття його сутності, стану і характеру дій залежать від детальності інформації про його складові – прості об'єкти. Для того щоб не втратити інформацію, не спотворити характеристики складного об'єкта, потрібно оперувати більш загальними поняттями, ніж поняття окремого простого об'єкта. В дану основу покладено поняття класифікації простих об'єктів щодо розпізнавальних ознак, призначення та їх основних характеристик.

Усі військові об'єкти при розміщенні і переміщенні на місцевості й у просторі, а також при функціонуванні відповідно до свого прямого призначення виявляють себе низкою ознак, що дозволяють впізнавати ці об'єкти.

Дешифрувальні ознаки є засобом вивчення і розрізнення зображень об'єктів. Однак у більшості випадків не дешифрувальні, а демаскуючі ознаки служать підставою для ухвалення рішення при розпізнаванні об'єктів по їх зображеннях [7].

Звичайно під ознаками об'єктів розуміють усе те, по чому можна довідатися, визначити або описати об'єкти. Необхідною умовою використання ознаки в якості демаскуючої є можливість виявлення об'єкта за допомогою технічних засобів моніторингу (ТЗМ).

Таким чином, під дешифрувальними ознаками будемо розуміти одержувані за допомогою ТЗМ ознаки об'єктів, за якими ці об'єкти можна виявити і розпізнати. Дешифрувальні ознаки, за якими об'єкти виявляються, будемо називати первинними, а ознаки, за якими об'єкти розпізнаються, – вторинними.

Необхідно відзначити, що якщо вторинні демаскуючі ознаки є постійними, то первинні дешифрувальні ознаки непостійні, вони залежать від освітлення, метеоумов, сезону року, умов зйомки і т.д. У ряді випадків динаміка зміни дешифрувальних ознак протягом визначеного часу, наприклад протягом доби, або при різних умовах освітлення і зйомки може стати додатковою дешифрувальною ознакою.

До первинних дешифрувальних ознак відносяться тон, колір і структура поверхні (рис. 4).

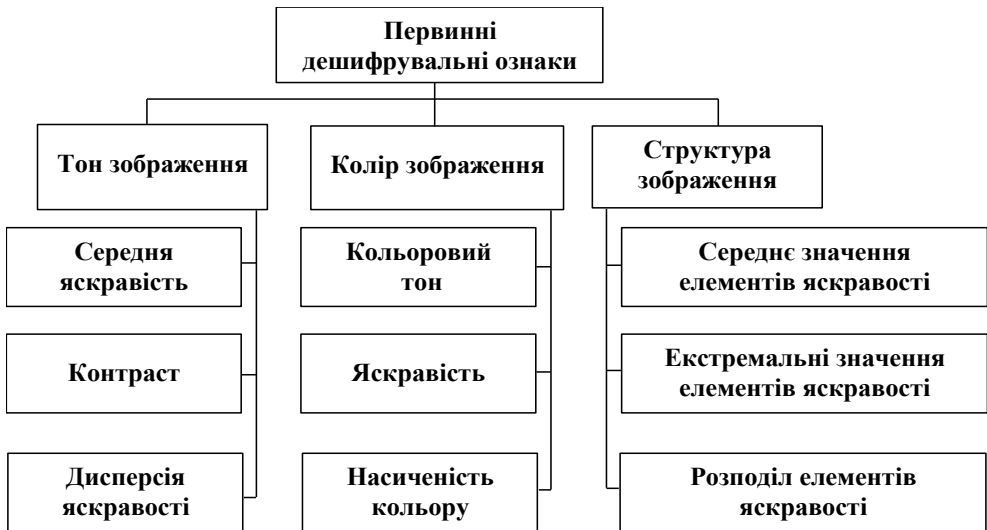


Рис. 4. Первинні дешифрувальні ознаки

Такі ознаки можна назвати індивідуальними. Це ознаки конкретних типів об'єктів, для впізнання яких можуть бути важливі навіть дрібні, на перший погляд незначні деталі.

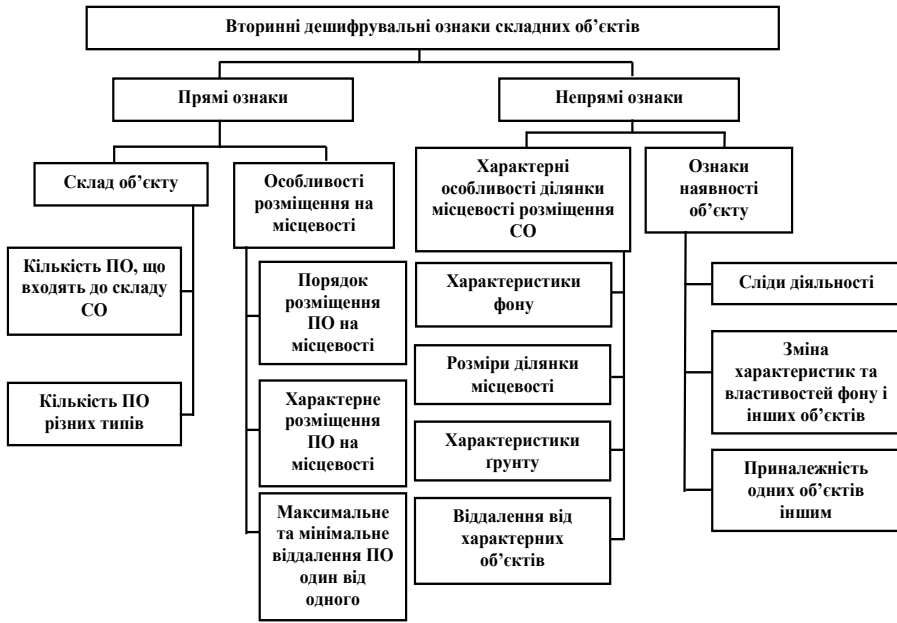


Рис. 5. Вторинні дешифрувальні ознаки

Вторинні дешифрувальні ознаки простих об'єктів іноді називають технічними демаскуючими ознаками. До прямих демаскуючих ознак відносяться форма, деталі, розміри (рис. 5).

Отже, дешифрувальні ознаки можна розділити на кількісні, які мають числове вираження, та якісні, такі як форма об'єктів. Успішне виконання процесу дешифрування залежить від багатьох об'єктивних і суб'єктивних факторів, які впливають на психофізіологічну діяльність фахівців і можуть бути згруповані в три групи.

До першої групи належать характеристики матеріалів, які використовуються для дешифрування. Це такі фактори, як роздільна здатність фото- та відеоматеріалів, тип і характер зображення, наявність метричних і геометричних викривлень, а також якість і висока якість обробки знімків радіотактів. За цією характеристикою значною мірою відрізняються точність і чіткість зображень.

Друга група охоплює технічне забезпечення дешифрувального процесу. Сюди входить ефективне використання наявних технічних засобів і допоміжних матеріалів, таких як довідники та бази даних, які сприяють підвищенню точності розпізнавання та інтерпретації.

Третя група факторів включає класифікацію об'єктів та вимоги до повноти і деталізації дешифрування. Вони суттєво впливають на швидкість і якість отримання інформації, значно повніше та швидше можна провести розпізнавання.

## Висновки

Відповідність класифікації та вимоги до розшифровки задач допоможуть формалізувати процес аналізу зображення, розгорнути послідовність виконання робіт і правильно оформити отримані результати.

Таким чином, для досягнення високої ефективності дешифрування необхідно врахувати всі зазначені фактори та забезпечити їх оптимальну інтеграцію в процес обробки даних. Це дозволяє підвищити точність, справедливість та об'єктивність оцінки, що є ключовими умовами для отримання надійних і корисних результатів у сфері аерокосмічного моніторингу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. (2005). Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків. *Екологія і ресурси*, 12, 37–55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling*. Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. (2021). Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 343 с. ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. (2019). Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, 1(19), 69–77. Івано-Франківськ: Симфонія форте. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Триснюк В.М. (2016). Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. *Системи обробки інформації*, 12, 185–188. Index Copernicus.
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. 18th International Conference Geoinformatics. Theoretical and Applied Aspects, Extended Abstracts.
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61–67.

Стаття надійшла до редакції 10.07.2024 і прийнята до друку після рецензування 14.10.2024

## REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klymenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 [in Ukrainian].
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. [in Ukrainian].



4. Mashkov, O.A., Trysnyuk, V.M., Mamchur, Y.V., Zhukauskas, S.V., Nigorodova, S.A., & Kurylo, A.V. (2019). A new approach to the synthesis of restorative control for remotely piloted aerial vehicles for environmental monitoring. *Environmental safety and balanced resource use: science and technology journal*, 1(19), 69-77 [in Ukrainian].
5. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188 [in Ukrainian].
6. Trysnyuk, V.M., Okhariev, V.O., Trysnyuk, T.V., Zorina, O.V., Kurylo, A.V., Golovan, Y.V., Smetanin, K.V., & Radlowska, K.O. (2019). Improving the algorithm of satellite images landscape interpretation. In *18th International Conference Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects*, Extended Abstracts.
7. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61-67.

*The article was received 10.07.2024 and was accepted after revision 14.10.2024*

**Марущак Василь Миколайович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6935-9949> **e-mail:** [stydjaga.fo.ru@gmail.com](mailto:stydjaga.fo.ru@gmail.com)

**Волинець Тарас Васильович**

аспірант Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9152-4680> **e-mail:** [alhimiktv@ukr.net](mailto:alhimiktv@ukr.net)

УДК 502.51:504.5

**Vasyl Trysnyuk<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** [trysnyuk@ukr.net](mailto:trysnyuk@ukr.net)

**Lidiia Horoshkova<sup>2</sup>**, Doctor of Economical Sciences, Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7142-4308> **e-mail:** [goroshkova69@gmail.com](mailto:goroshkova69@gmail.com)

**Vyacheslav Okhariev<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6270-6293> **e-mail:** [okhariev.vo@gmail.com](mailto:okhariev.vo@gmail.com)

**Viktor Shumeiko<sup>1</sup>**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-4566> **e-mail:** [shym1983@ukr.net](mailto:shym1983@ukr.net)

<sup>1</sup>Institute of Telecommunications and Global Information Space of NASU, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National University of «Kyiv-Mohyla Academy», Kyiv, Ukraine

## **GEOGRAPHIC INFORMATION TECHNOLOGIES FOR RESEARCH ECOSYSTEM OF KHORTYTSA ISLAND AT STATE OF WAR**

**Abstract.** *The work is devoted to solving the scientific and practical task of studying the impact of war on nature conservation areas using the example of Khortytzia Island, which is part of the Khortytzia National Reserve. The study used multispectral imaging data from the LANDSAT 5 satellite (MSI scanner). It is shown that as a result of the destruction of the Kakhovka Reservoir, the water level in the Dnipro River decreases, which affects the water bodies of Khortytzia Island (lakes and straits). It is established that there is a critical impact on the state of biodiversity of the island due to the reduction in the area of the water mirror in some lakes of the island or the disappearance of lakes in general. Key critical impacts for the ecology of the island ecosystem were identified, such as lowering the water level, changes in the river flow, and reducing the oxygen potential of the hydroecosystem. Conclusions were drawn on the need for detailed monitoring, implementation of restoration programs, and improvement of water quality.*

**Keywords:** *information technologies, ecosystem, remote methods, contact methods, ecological monitoring, anthropogenic impact, hydroecosystem.*

**В.М. Триснюк<sup>1</sup>, Л.А. Горошкова<sup>2</sup>, В.О. Охарєв<sup>1</sup>, В.О. Шумейко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний університет «Києво-Могилянська академія», м. Київ, Україна

## **ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОСИСТЕМ ОСТРОВА ХОРТИЦЯ В УМОВАХ ВІЙНИ**

**Анотація.** *Роботу присвячено вирішенню науково-практичного завдання дослідження впливу війни на природоохоронні території на прикладі острова Хортиця, який входить до складу Національного заповідника «Хортиця». У дослідженні використовувалися дані мультиспектральної зйомки із супутника «LANDSAT 5» (сканер MSI). Показано, що внаслідок знищення Каховського водосховища відбувається зниження рівня води в річці Дніпро, що впливає на водні об'єкти острова Хортиця (озера і протоки). Встановлено*

наявність критичного впливу на стан біорізноманіття острова внаслідок зменшення площі водного дзеркала в деяких озерах острова або зникнення озер загалом. Визначено ключові критичні для екології екосистеми острова наслідки, такі як зниження рівня води, зміни в течії річки, зменшення кисневого потенціалу гідроекосистеми. Зроблено висновки про необхідність здійснення детального моніторингу, реалізації програм відновлення та покращення якості води.

**Ключові слова:** інформаційні технології, екосистема, дистанційні методи, контактні методи, екологічний моніторинг, антропогенний вплив, гідроекосистема.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.145-156>

## Вступ

Сьогодні 900 природоохоронних територій, що становить 44% площ усіх заповідників та національних парків України, знаходяться на тимчасово окупованих територіях або у зоні бойових дій і їм завдано суттєвої шкоди. Але, на жаль, природоохоронні об'єкти і на іншій території України потерпають від війни. Глибокий аналіз наслідків військового вторгнення на заповідні природні території України буде можливий лише після закінчення війни та завершення робіт з розмінування. Але вже сьогодні існує необхідність в проведенні досліджень стану територій з використанням можливих джерел інформації. Однією з таких територій є Національний заповідник «Хортиця». Свій статус він отримав у 1993 році. До складу Національного заповідника «Хортиця» входять: власне острів Хортиця; прилеглі острови Байда, Три Стоги, Дубовий, Розстебин; скелі Середня, Близнюки; урочище Вирва на правому березі Дніпра; пам'ятка історії національного значення «Кам'янська Січ» на Херсонщині. Острів Хортиця, який входить до складу Національного заповідника «Хортиця», – найбільший острів на Дніпрі (довжина 12,5 км, найбільша ширина – до 2,5 км). Загалом Хортиця, найбільший річковий острів у Європі, є унікальним поєднанням природної краси та історико-культурної спадщини, де можна побачити степи, гори і скелі, лісостепи, листяні та хвойні ліси, плавні, озера, нагорні діброви та висячі болота.

Неповторність природи острова Хортиця полягає в тому, що на порівняно невеликій території (трохи менше 2,5 тисяч гектарів) наявні зразки усіх ландшафтних зон України: гори, ліс, лісостеп, плавневий ліс, степ, навіть осередки напівпустель. До війни на острові росли близько 1092 види рослин, 670 із яких – дикі (для порівняння – в Асканії Новій 451 вид диких рослин), 145 видів із них – рідкісні, 104 – ендеміки (більше ніде, окрім Хортиці, не зустрічаються). На острові мешкають 250 видів тварин, із яких 200 видів – птахи (усього в Україні 433 види пернатих).

Острів утворився завдяки декільком геологічним розломам, останній з яких стався приблизно 2,5 млн років тому. Вік його геологічної основи – масиву гранітоїдів – близько 3 млрд років.

Отже, острів є також місцем, де виходять на поверхню найдавніші у світі граніти, вік яких, за оцінками геологів, сягає трьох мільярдів років. На острові збереглися 63 історичні пам'ятки, що охоплюють період від кам'яного віку до скіфської, слов'янської та козацької епох.

До війни нераціональне будівництво та відсутність контролю за туристичною діяльністю призвели до знищення природних ландшафтів,

знищення місць проживання дикої природи та забруднення території. Для вирішення цих проблем вживались комплексні заходи, включаючи посилення екологічного контролю, впровадження програми з відновлення екосистем, підвищення екологічної свідомості населення та розвиток екологічного туризму, орієнтованого на збереження природних ресурсів заповідника.

З початком війни ця територія зазнає нищівного впливу внаслідок обстрілів, пожеж та ін. Руйнування Каховського водосховища, яке сталося внаслідок російської агресії, мало катастрофічні наслідки для навколишнього середовища заповідника. Це водосховище було важливим компонентом гідрологічної системи річки Дніпро, і його знищення значно вплинуло на екосистеми в нижній течії річки, зокрема, на заповідник Хортиця. Втрата водосховища порушила екологічний баланс, і його наслідки потребують детального аналізу та заходів з відновлення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Експериментальні дослідження техногенних чинників, пов'язаних із моделюванням балочних структур Національного заповідника Хортиця за матеріалами мультиспектральних космічних знімків, базуються на використанні методики експертної оцінки та сучасних інформаційних технологій. В Україні провідними науковцями в галузі космічних досліджень ґрунтів є: Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д., які займаються космічним моніторингом забруднення земель [1-2], Лялько В.І., який досліджує спектральні характеристики рослинного покриву; Попов М.О., який спеціалізується на прогнозуванні врожайності зернових культур на основі багатоспектральних даних дистанційного зондування Землі. Результати власних досліджень природоохоронних територій, в тому числі впливу на них війни, наведені у статтях [3-7].

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка та удосконалення інформаційно-технічного моделювання порушення екосистем острова Хортиця за матеріалами мультиспектральних космознімків.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

За останні роки заповідник Хортиця (рис. 1) зіткнувся з низкою екологічних проблем, які загрожують його екосистемі та збереженню біорізноманіття.

Однією з основних проблем є забруднення річки Дніпро, яка є головним джерелом води для острова та його озер. Зростання індустріалізації та неконтрольовані скиди відходів у річку призвели до значного зниження якості води. Це, у свою чергу, негативно впливає на водну флору та фауну, зменшує кількість риб та інших водних організмів, які мешкають у заповіднику.

Друга серйозна проблема – вирубка лісів та знищення рослинного покриву. Незаконні вирубки дерев, а також пожежі внаслідок обстрілу російськими військами спричиняють деградацію лісових екосистем острова. Це зменшує площу природного середовища для багатьох видів тварин та рослин, деякі з яких є рідкісними або зникаючими.

Третя загроза – антропогенний вплив, зокрема неконтрольований туризм та забудова території острова.



Рис. 1. Карта острова Хортиця

З урахуванням важливості стану водних ресурсів для екосистеми острова Хортиця, заслуговує на особливу увагу проведення екологічного моніторингу басейну Дніпра та стану озер острова.

Основною методикою збору та систематизації інформації стало опрацювання картографічного матеріалу за допомогою векторизації. Під час створення бази даних враховувалися характерні риси природних об'єктів та їх взаємодія. Ще одним підходом для отримання інформації, який був використаний при моделюванні систем, було опрацювання бази даних дистанційного зондування Землі. З огляду на важливість даних дистанційного зондування для оцінки ступеня антропогенного впливу на довкілля, були використані знімки з різних періодів, отримані з таких космічних апаратів, як Sentinel-2, «LANDSAT-5».

Сучасні технічні засоби дистанційного зондування дозволяють отримувати різноманітну інформацію про властивості земної поверхні в різних діапазонах спектру: у видимому (0,3-0,8 мкм), ближньому (1,8-5,3 мкм) і дальньому (7-14 мкм) інфрачервоному діапазоні, а також у мікрохвильовому діапазоні (3-100 см). Спеціалізовані методи обробки цієї інформації дозволяють вивчати закономірності просторово-часових розподілів водних мас, які відрізняються за вмістом розчинених або зважених речовин як природного, так і антропогенного походження. Вся кадастрова інформація була опрацьована за допомогою геоінформаційних технологій у програмному середовищі ArcGIS.

Руйнування Каховського водосховища призвело до серйозних змін у гідрологічному режимі Дніпра. На рис. 2 наведений космічний знімок супутника «LANDSAT-5» острова Хортиця в жовтні 2014 року та 06 липня 2024 року. Їх порівняння свідчить про суттєве обміління Дніпра навколо острова Хортиця.

Акваторія заплави острова Хортиця поділена на 23 озера і протоки. Перш за все, це озера Домака (рис. 3), Прогній, Прогній 2 (рис. 4), Осокорове (рис. 5), Голоківське (рис. 6), Річище (рис. 7), Гниле, Підкручне, Безіменне, Гвардійське, Золоте, Рисове, Черепахове, Безіменне, Кам'яне, а також протоки між ними.



A)



Б)

Рис. 2. Космічні знімки супутника «LANDSAT-5» острова Хортиця 10.2014 (А) та 06.07.2024 (Б)

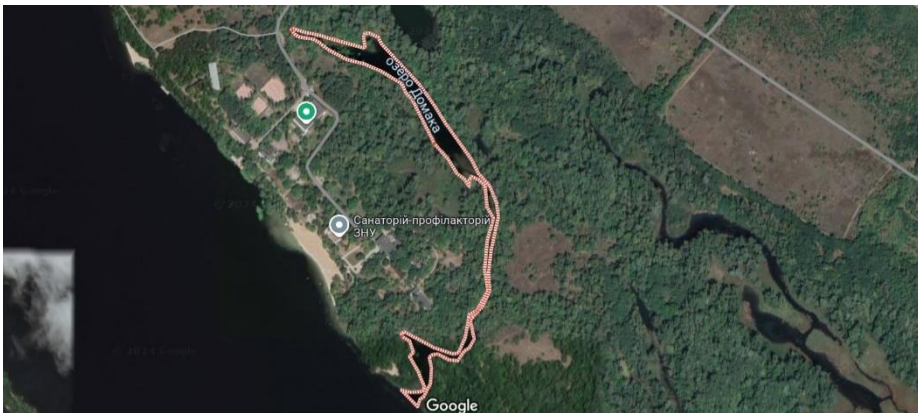


Рис. 3. Космічний знімок озера Домака



Рис. 4. Космічний знімок озера Прогній, Прогній 2

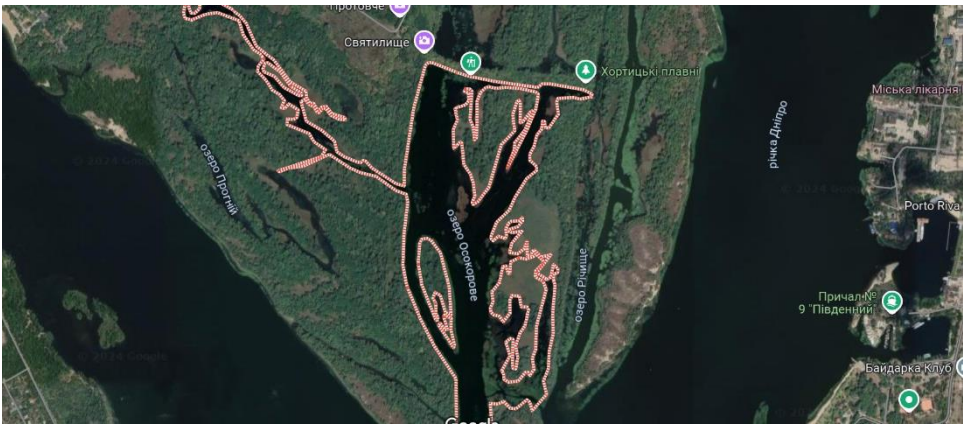


Рис. 5. Космічний знімок озера Осокорове

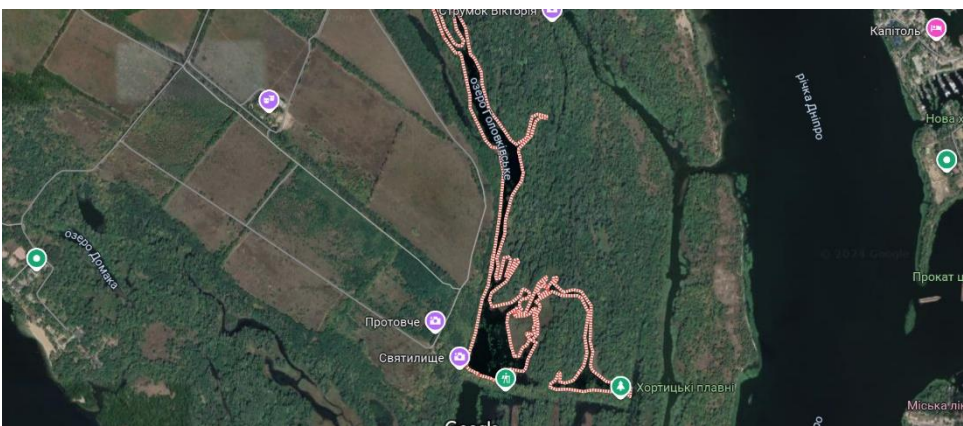


Рис. 6. Космічний знімок озера Голоківське



Рис. 7. Космічний знімок озера Річище

Руйнування Каховського водосховища призвело також до зневоднення або повної втрати водного дзеркала озер. Внутрішні водойми острова Хортиця (озера) були заживлені від Дніпра. Внаслідок відходу води річки Дніпро від берегів, з озер почала стікати вода, оскільки вони знаходяться вище Дніпра. В 2023 році не сталося екологічної катастрофи завдяки тому, що більшість риби вийшла в Дніпро разом з водою.

Але цілком зрозуміло, що від зневоднення водойм постраждали птахи, які прилітали на острів гніздитись. Ті, що вже загіздилися, загинули разом із пташенятами, але більшість відкочували на інші території.

Через обміління почали сохнути і водні рослини. На жаль, це цінні водноболотні комплекси, занесені до Зеленої книги України.

Як відомо, Хортицька заплава не завжди була такою, як ми її бачили до знищення Каховського водосховища. Наповнення чаші Каховського водосховища відбулось у 1958 році. Це призвело до поступового підвищення рівня води в околицях Хортиці близько на +1,5 метра. Тобто після зниження Каховського водосховища рівень води навколо Хортиці опинився на «історичному» рівні. Як відомо, Хортицькі плавні за часів козацтва періодично затоплювались весняним паводком (ділянки суходолу). Але це не дає підстав вважати ситуацію не загрозливою. Знищення водосховища спричинило різке, неконтрольоване зниження рівня води, що створило негативний вплив на екологію Дніпра і Хортиці не тільки сьогодні, а й в майбутньому.

Науковці очікували, що підняття рівня води у весняний період 2024 року призведе до того, що наслідки для природи заплавної частини острова будуть не надто критичними. Але дослідження, проведені у серпні 2024 року, показали, що ситуація з озерами (їх водним дзеркалом) є критичною.

Як було виявлено під час експедиції на острів Хортиця, найскладнішою вона є на озерах Домака, Прогній, Прогній 2 та Рисове.

Озеро Домака повністю висохло, його дно – це піскові відкладення (рис. 8). Це підтверджено як у ході проведеної експедиції, так і за даними космічних знімків.

Щодо озера Прогній, то на рис. 9 наведені космічні знімки озера у жовтні 2014 року та станом на 08.07.2024 р. На рис. 10 наведені фотографії того, як зазначене озеро виглядало 10 років тому (у серпні 2014 року) і станом на 30 серпня 2024 року. Як бачимо, озеро припинило своє існування. Якщо рік тому ще були залишки води, то сьогодні – вони повністю відсутні.





А)



Б)

Рис. 8. Космічний знімок озера Домака 1.10.2014 (А) та 8.07.2024 (Б)



A)



Б)

Рис. 9. Космічний знімок озера Прогній 1.10.2014 (А) та 8.07.2024 (Б)



а



б

Рис. 10. Знімки озера Прогній на острові Хортиця Запорізької обл.: а – фото дна висохлого озера 30 серпня 2024 року; б – фото озера 24 серпня 2014 року

Отже, вже сьогодні можна вважати наслідки знищення Каховського водосховища критичними для екології острова Хортиця. Основні наслідки включають:

1. Зниження рівня води. Рівень води в річці Дніпро, особливо в її нижній течії біля заповідника Хортиця, знизився через зменшення водних ресурсів, що надходять з водосховища. Це викликало зменшення площі водного дзеркала та зміну гідрологічного режиму.

2. Зміни в течії річки. Після зниження рівня води змінилися швидкість і напрямок течії річки. Це вплинуло на водний баланс і сприяло утворенню нових русел, що змінило існуючі гідрологічні умови в заповіднику.

3. Збільшення концентрації забруднюючих речовин. Зниження рівня води призвело до підвищення концентрації забруднюючих речовин, що потрапляють у воду з поверхневого стоку. Це негативно вплинуло на якість води і зменшило її кисневий потенціал.

Основними впливами на водний баланс і екосистему є такі:

1. Зміни в біорізноманітті. Втрата стабільності водного середовища призвела до загибелі водоростей, водних рослин і риби, що порушило харчові ланцюги. Нестача води і погіршення якості води негативно вплинули на види, що залежали від стабільних водних умов.

2. Проблеми з водоплавними птахами і амфібіями. Заповідник Хортиця є важливим середовищем для водоплавних птахів і амфібій. Зниження рівня води і погіршення якості води зменшили кількість місць для розмноження і проживання цих видів.

3. Порушення рослинного покриву. Втрата води вплинула на зростання водних рослин, що є важливими для стабільності екосистеми.

Зменшення площі водних рослин і їх загибель негативно вплинули на цілу екосистему, що спостерігається, на жаль, вже сьогодні.

З урахуванням важливості острова Хортиця, як складової Національного заповідника Хортиця, існує необхідність проведення подальших досліджень та заходів екологічного моніторингу.

## Висновки

Руйнування Каховського водосховища мало глибокий вплив на гідроєкосистему острова Хортиця. Зміни в рівні поверхневих та підземних вод, якість води та екосистемні наслідки потребують термінових і скоординованих зусиль для відновлення природного балансу. Важливо здійснити детальний моніторинг, реалізувати програми відновлення і покращення якості води, а також враховувати соціальні аспекти впливу на місцеві громади. Відновлення острова Хортиця стане важливим кроком у забезпеченні стійкого природокористування і збереження екологічної цінності цього унікального природного комплексу.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. (2005). Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків. *Екологія і ресурси*, 12, 37–55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013]. Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling*. Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. (2021). Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду. Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 343 с. ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61–67.
5. Horoshkova L., Skrynchenko K., Menshov O., Maslova O., Korniihuk Y. Ecological risks of the impact of war on nature reserves in Ukraine (using the example of the Azovo-Sivash National Nature Park). XVII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment». European Association of Geoscientists & Engineers. 7-10 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520226>
6. Horoshkova L., Antoniuk D., Vasyl'yeva O., Markova S., Filipishyna L. Risk management and lost profits calculations of business entities. 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580058>
7. Триснюк В.М. (2016). Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. *Системи обробки інформації*, 12, 185–188. Index Copernicus.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2024 і прийнята до друку після рецензування 29.08.2024

## REFERENCES

1. Krasovsky, G.Ya., Trofymchuk, O.M., Kreta, D.L., Klymenko, V.I., Ponomarenko, I.G., & Sukhodubov, O.O. (2005). Synthesis of cartographic models of land pollution by man-made dust using space images. *Ecology and resources*, 12, 37-55 [in Ukrainian].

2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. (2013). Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. In *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling* (pp. 347-352). Springer, Berlin, Heidelberg.
3. Trofymchuk, O.M., Adamenko, O.M., & Trysnyuk, V.M. (2021). Geoinformation technologies for environmental protection of the nature reserve fund. Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine; Ivano-Frankivsk national technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk: Suprun V.P. [in Ukrainian].
4. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Nikitin, A. (2018). Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. *Centrul Universitar Nord Din Bala Mare*, 1, 61-67.
5. Horoshkova, L., Skrynchenko, K., Menshov, O., Maslova, O., Korniiuchuk, Y. (2023). Ecological risks of the impact of war on nature reserves in Ukraine (using the example of the Azovo-Sivash National Nature Park). In XVII International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment». European Association of Geoscientists & Engineers. 7-10 November 2023, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520226>
6. Horoshkova, L., Antoniuk, D., Vasylyeva, O., Markova, S., Filipishyna, L. (2022). Risk management and lost profits calculations of business entities. In 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment. European Association of Geoscientists & Engineers (pp. 1-5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580058>
7. Trysnyuk, V.M. (2016). Environmental safety management system of natural and anthropogenically modified geosystems. *Information processing systems*, 12, 185-188 [in Ukrainian].

*The article was received 17.05.2024 and was accepted after revision 29.08.2024*

**Триснюк Василь Миколайович**

доктор технічних наук, професор, завідувач відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9920-4879> **e-mail:** trysnyuk@ukr.net

**Горошкова Лідія Анатоліївна**

доктор економічних наук, професор, професор кафедри екології Національного університету «Києво-Могилянська академія»

**Адреса робоча:** вул. Григорія Сковороди, 2, м. Київ, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7142-4308> **e-mail:** goroshkova69@gmail.com

**Охарєв Вячеслав Олександрович**

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу природних ресурсів Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

**Шумейко Віктор Олександрович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу досліджень навколишнього середовища Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0285-4566> **e-mail:** shym1983@ukr.net

УДК 004.6; 556.5

**Anton Gordeev**, Dr. Sci. (Geogr.), Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7263-0525> **e-mail:** drangoru@gmail.com

**Sergiy Fedoseienkov**, PhD (Geol.), Director

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> **e-mail:** 22lex22s@ukr.net

**Oleksiy Shundel**, PhD (Phys. & Math.), Head of the Department of hydroacoustic research

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

**Oleksandr Shchypsov**, PhD (Jur.), Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3374-1012> **e-mail:** ss0806365@gmail.com

**Svitlana Nevierova**, Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7472-4776> **e-mail:** sidzp2019@gmail.com

State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

## **SOME ASPECTS OF CREATING A SYSTEM OF OCEANOGRAPHIC DATA QUALITY ASSURANCE AND CONTROL**

**Abstract.** *This article is dedicated to substantiating the methods for quality control of temperature and salinity data in marine environmental research. Accurate and reliable measurements of these parameters are critical for modeling oceanographic processes, monitoring climate change, and preserving marine ecosystems. The study examines primary data collection methods, including in situ measurements, remote sensing, and laboratory analysis, with a detailed description of equipment such as CTD devices, ARGO floats, and autonomous underwater vehicles. Recommendations on calibration, standardization, and data processing are discussed, along with the use of modern software to ensure data quality. The article demonstrates the importance of controlled data for various research tasks, such as climate modeling, ocean current analysis, and marine resource management. The significance of a comprehensive approach to ensuring data accuracy for the advancement of science and effective environmental management is emphasized.*

**Keywords:** *oceanographic data bank, CTD instruments, oceanographic research, oceanographic data quality.*

---

© А.Ю. Гордеев, С.Г. Федосєєнков, О.І. Шундель, О.О. Щипцов, С.І. Невєрова, 2024

А.Ю. Гордєєв, С.Г. Федосєєнков, О.І. Шундель, О.О. Щипцов, С.І. Неверова

Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України», м. Київ, Україна

## ДЕЯКІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ОКЕАНОГРАФІЧНИХ ДАНИХ

***Анотація.** Стаття присвячена деяким аспектам створення системи забезпечення та контролю якості океанографічних даних, а саме обґрунтуванню методів контролю якості даних температури та солоності у дослідженнях морського середовища. Точні та надійні вимірювання цих параметрів є критичними для моделювання океанографічних процесів, моніторингу кліматичних змін і збереження морських екосистем. У роботі розглянуто основні методи збору даних, включаючи натурні вимірювання, дистанційне зондування та лабораторний аналіз, із детальним описом обладнання, такого як CTD-прилади, поплавки ARGO та автономні підводні апарати. Описано рекомендації з калібрування, стандартизації та обробки даних, а також використання сучасного програмного забезпечення для забезпечення якості даних. Стаття демонструє значення контрольованих даних для різних дослідницьких завдань, таких як моделювання клімату, аналіз морських течій і управління морськими ресурсами. Підкреслюється важливість комплексного підходу до забезпечення точності даних для подальшого розвитку науки та ефективного екологічного управління.*

***Ключові слова:** банк океанографічних даних, CTD-прилади, океанографічні дослідження, якість океанографічних даних.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.157-168>

### Вступ

Соціальну значущість вимірювань та відбору проб на морі, а також необхідність якомога ширшого та зручнішого для користувачів розповсюдження результатів неможливо переоцінити. З баз даних можна і потрібно отримувати більше послуг і продуктів, корисних для науковців, промисловості, широкого загалу та політиків.

З цією метою в Державній установі «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України» було створено Банк океанографічних даних НАН України (рис. 1) [1].

Банк океанографічних даних об'єднує відкриті цифрові сховища різноманітних наборів даних для управління, доступу та обміну даними, інформацією, продуктами та знаннями, що збираються океанографічним флотом, історичними даними (зібрані у попередні роки і навіть століття) з різних джерел (інтернет, книги, статті, звіти експедиційних досліджень тощо), новими автоматичними системами спостереження та космічними засобами [2].

Наповнення океанографічними даними банку – одна з головних цілей його актуальності. Для цього виконується комплекс заходів, а саме збір емпіричних даних з різних джерел – експедиційні дослідження з застосуванням суден, збір інформації з мобільних та стаціонарних станцій, супутникові дані тощо [3]. Головним показником зібраних даних з різних джерел та різноманітним обладнанням є їх якість. Якість даних – характеристика, що свідчить про придатність даних до використання. Це також стосується стану набору значень

якісних чи кількісних змінних, якими є емпіричні океанографічні дані, зібрані океанографічним обладнанням у природному середовищі. Дані зазвичай вважаються високоякісними, якщо вони придатні для передбачуваного використання в подальшому, при ухваленні рішень та плануванні. Якість зібраних даних впливає на якість результатів аналізу та прогнозу природного довкілля, ситуаційного та прогнозного моделювання, де ці дані є основою розрахунків.

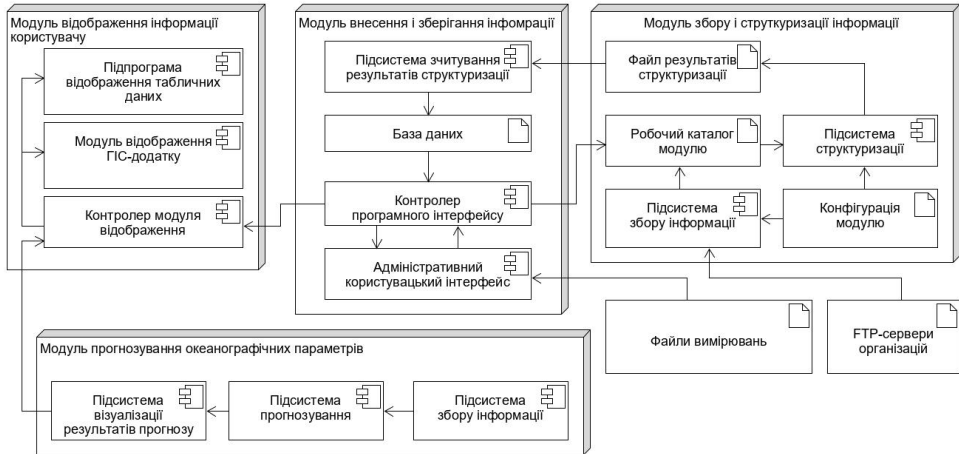


Рис. 1. Архітектура Банку океанографічних даних НАН України

Для вирішення поставлених задач необхідно створити комплексний підхід до контролю якості емпіричних даних до їх внесення до Банку океанографічних даних НАН України. Це стосується форматів, географічної прив'язки даних, отриманих з різного обладнання, повноти метаданих, контролю за системними та випадковими відхиленнями в серіях даних, роботи обладнання, умов збору тощо. Також треба зважати на участь України в роботі з міжнародного обміну океанографічними даними і забезпечення якості на рівні державних та міжнародних стандартів.

Рішенням цієї проблеми займаються всі утримувачі подібних банків океанографічних даних. Розроблено міжнародні стандарти та рекомендації, що потребують застосування з врахуванням наявного локального обладнання та власної специфіки збору даних.

Архівування та збереження даних надає можливість їх повторного використання у нових дослідженнях; збереження унікальних даних спостережень, які неможливо відтворити; розширення наявних даних для дослідницьких проектів, а також для управління морським середовищем, освіти, історії та інших цілей [3].

Довіра до даних включає важливі аспекти, які розглядаються в дослідженнях на основі даних: безпека, конфіденційність, право власності, гарантоване походження, автентичність, а також якість даних та метаданих.

Тому до забезпечення збереження даних – внесення до банку океанографічних даних – необхідно здійснити перевірку і контроль за якістю даних, що будуть зберігатись та використовуватись у подальших дослідженнях користувачів.



В цій статті розглянуто деякі аспекти створення системи забезпечення та контролю якості океанографічних даних з врахуванням міжнародних рекомендацій та досвіду в галузі обміну океанографічними даними.

**Метою цієї статті є** дослідження та обґрунтування методів контролю якості даних на прикладі вимірювання температури та солоності у морських дослідженнях. У статті розглядаються методи, перевірені практики, стандарти контролю якості, програмне забезпечення та приклади використання контрольованих даних, які забезпечують надійність океанографічних даних.

## **Виклад основного матеріалу дослідження**

Високоякісні дані про температуру та солоність є основою для багатьох океанографічних досліджень, адже саме ці параметри визначають фізичні властивості морської води, зокрема її щільність, яка впливає на циркуляцію водних мас та інші процеси, що відбуваються в океанах. Надійність таких даних є критично важливою для моделювання кліматичних змін, оцінки стану морських екосистем, а також для прогнозування глобальних та локальних змін у морському середовищі [4–6].

Забезпечення точності цих даних залежить від багатьох чинників: від типу використовуваного обладнання та методів збору до умов проведення вимірювань і процедур обробки. Для отримання репрезентативних і достовірних результатів необхідно враховувати специфіку роботи з різними технологіями, такими як натурні вимірювання, дистанційне зондування та лабораторний аналіз. Кожен із цих методів має свої переваги й виклики, пов'язані з особливостями збору даних у складних природних умовах і на різних глибинах.

Подальший виклад основного матеріалу зосереджується на детальному аналізі методів збору океанографічних даних. Розглянуто, як сучасні технології забезпечують точність вимірювань, які процедури дозволяють мінімізувати похибки, а також які підходи використовуються для забезпечення відповідності міжнародним стандартам. Особливу увагу приділено опису ключових інструментів, таких як *CTD*-прилади, автономні поплавки *ARGO*, а також супутникові та лабораторні методи аналізу.

### *1. Методи збору океанографічних даних*

Сучасні методи збору даних для вимірювання параметрів температури та солоності океанічної води ґрунтуються на використанні різноманітного обладнання та технологій, які забезпечують точність і надійність результатів. До найбільш поширених методів відносяться натурні вимірювання, дистанційне зондування та лабораторний аналіз.

Одним з основних приладів натурних вимірювань в океанології для отримання даних є *CTD*-датчики, що вимірюють солоність, температуру води та тиск [7]. *CTD*-прилади широко застосовуються на дослідницьких суднах і дозволяють отримати точні профілі властивостей водяного стовпа. Під час розгортання робіт *CTD*-прилад занурюється на задану глибину, а дані реєструються як при опусканні, так і при підйомі пристрою. Використання *CTD*-приладів вимагає регулярної перевірки, тобто калібрування, яке зазвичай виконується з використанням стандартизованих еталонів, рекомендованих

Міжурядовою океанографічною комісією ООН (далі – МОК). Це дозволяє досягати високої точності у вимірюваннях та зменшує ризик похибок, викликаних умовами навколишнього середовища, що особливо важливо при зборі даних на значних глибинах, де температурні коливання можуть бути мінімальними, але суттєвими для аналізу.

Крім *CTD*-приладів, натурні вимірювання температури можуть виконуватись за допомогою термісторів та термопар, які відзначаються високою чутливістю та здатністю швидко реагувати на зміни температури. Термопари, зокрема, часто застосовуються для точних вимірювань у лабораторних умовах та для обробки проб води, де потрібна деталізована інформація про температуру зразків. Завдяки своїй високій чутливості та широкому діапазону вимірювань, термістори та термопари забезпечують надійність результатів у процесах, де зміна температури може суттєво впливати на хімічні або біологічні властивості води.

Автономні дрейфуючі поплавки *ARGO* також роблять великий внесок у збір океанографічних даних, особливо для віддалених або важкодоступних регіонів океану [8]. Поплавки *ARGO* здатні занурюватися на глибину до 2000 метрів, де вони збирають дані, зокрема – про температуру та солоність, які потім передаються дослідникам через супутник. Ця технологія дозволяє проводити безперервний моніторинг океану в глобальному масштабі, забезпечуючи дослідників детальною інформацією про зміни температури та солоності в різних кутках світу. Поплавки є автономними, а тому можуть збирати дані впродовж тривалого періоду, що дозволяє створювати тривалі часові ряди для кліматичних досліджень. Ці методи надають дискретні океанографічні дані стану океану.

Крім натурних методів, для отримання океанографічних даних широко застосовується дистанційне зондування за допомогою супутників. Супутникові системи, такі як *AVHRR* (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), *MODIS* (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), забезпечують точні вимірювання температури поверхні моря (*sea surface temperature – SST*). Деякі сучасні супутники також здатні оцінювати солоність поверхні води, що є важливим для досліджень впливу глобальних змін клімату на циркуляцію океанів [9]. Дані супутникових спостережень поверхні океану використовуються для аналізу великих ділянок в режимі реального часу і є критично важливими для прогнозування кліматичних змін та екологічного моніторингу. При цьому отримуються поля океанографічних даних стану поверхні океану (до 1 см вглиб).

Автономні підводні апарати (далі – АПА), такі як глибоководні дрони, також займають важливе місце в дослідженнях морського середовища. Вони можуть занурюватися на великі глибини, збираючи дані температури і солоності, а також інші параметри, недоступні для традиційних методів. АПА дозволяють вивчати унікальні зони, такі як гідротермальні джерела або полярні регіони, де використання звичайного обладнання може бути обмежене. Завдяки своїй автономності АПА можуть працювати у важкодоступних умовах, забезпечуючи дослідників цінними даними про фізичний і хімічний склад води [10].

Значення лабораторного аналізу у зборі даних полягає в можливості отримати детальну інформацію про склад води (одним з параметрів якої є солоність), яку неможливо визначити за допомогою польових методів.

Наприклад, зразки води, зібрані з різних глибин за допомогою пляшок *Niskin* чи *GO-FLO*, можуть бути збережені для подальшого аналізу у лабораторіях. Для контролю якості зразків часто застосовуються процедури консервування, що включають використання хімічних речовин або зберігання при низьких температурах, щоб уникнути розкладання органічних речовин або змін вмісту розчинених газів. Лабораторний аналіз надає детальну інформацію про концентрацію поживних речовин, мікроелементів, а також розчиненого органічного вуглецю, що є важливим для розуміння біогеохімічних процесів у морських екосистемах.

Таким чином, комплексний підхід до збору океанографічних даних, що включає натурні вимірювання, дистанційне зондування та лабораторний аналіз, забезпечує інтегральний підхід до глибокого розуміння процесів у морському середовищі.

## *2. Практики та рекомендації з контролю якості*

Забезпечення точності та надійності даних температури і солоності вимагає ретельного контролю на кожному етапі збору і обробки даних. МОК та інші міжнародні організації надають конкретні рекомендації для встановлення високих стандартів у процесах збору, калібрування і стандартизації даних.

Однією з ключових практик є регулярна перевірка та калібрування вимірювальних приладів. Це особливо важливо для приладів, які використовуються в польових умовах, оскільки вони схильні до змін і похибок під впливом зовнішніх факторів під час експлуатації та транспортування. Калібрування забезпечує точність показників та їх відповідність стандартам, що особливо важливо для довготривалих вимірювань. Наприклад, перед кожним розгортанням *CTD*-приладу на дослідницькому судні він проходить калібрування з використанням сертифікованих еталонів. Для солоності це можуть бути стандартизовані розчини морської води, що допомагають усунути похибки, спричинені забрудненням чи зносом обладнання.

Не менш важливою є стандартизація процедур для забезпечення порівнянності отриманих результатів. Наприклад, всі дані, зібрані різними науковими групами або з різних дослідницьких суден, повинні бути однаково оброблені і задокументовані, щоб уникнути розбіжностей у результатах. МОК рекомендує застосовувати єдині протоколи збору даних, які включають послідовність вимірювань, порядок обробки зразків, а також процедури зберігання даних у спеціалізованих базах [11]. Завдяки цьому всі зібрані дані зберігаються в уніфікованому форматі, що дозволяє їх використовувати у масштабних дослідженнях і порівняннях, наприклад, у кліматичних моделях.

Ще одним важливим аспектом контролю якості є автоматизований аналіз ідентифікації аномалій, що може виявляти непередбачувані відхилення. Наприклад, якщо під час експедиції були отримані значення температури, які значно відрізняються від середньорічних для певної точки, система автоматично виділяє ці значення для подальшої перевірки. Це дозволяє оперативно виправляти дані, якщо аномалія виникла через технічний збій, або ж підтвердити зміни, що можуть вказувати на кліматичні аномалії.

Іншим важливим аспектом є збереження та архівування даних. Зібрані дані з температури та солоності мають надійно зберігатися для забезпечення їхньої доступності в майбутньому. Для цього використовується спеціалізоване програмне забезпечення для зберігання і управління даними, яке дозволяє

зберігати інформацію з високим ступенем захисту. Архівування даних в міжнародних базах, таких як *PANGAEA* або *World Ocean Database*, забезпечує не лише довготривале зберігання, але й доступність для інших наукових груп [12, 13]. Це дозволяє використовувати ці дані для подальших досліджень, порівняння або перевірки результатів.

Ці рекомендовані практики є основою для можливості забезпечення високої якості параметрів океанографічних даних, необхідних для надійного аналізу стану океанів та прогнозування кліматичних змін.

### 3. Стандартизація та протоколи перевірки

Стандартизація є ключовою вимогою для забезпечення узгодженості та якості даних у морських дослідженнях. Чіткі стандарти та протоколи забезпечують порівнянність отриманих даних незалежно від місця, часу збору або використовуваних інструментів. Основні міжнародні організації, такі як МОК, надають чіткі рекомендації щодо збору даних, які сприяють створенню єдиної системи при плануванні та виконанні океанографічних досліджень [11].

Крім того, для підтримки якості даних необхідно використовувати стандартизовані протоколи перевірки. Це включає як процедури автоматичної обробки, так і збереження та архівування даних. Після збору дані проходять обов'язкову процедуру валідації, під час якої проводять перевірку на наявність аномалій, що можуть свідчити про технічні помилки або збій обладнання. Наприклад, значення, які суттєво відрізняються від середньостатистичних для певного регіону чи сезону, підлягають окремому детальному аналізу людиною.

Таким чином, стандартизація забезпечує стійкість і якість даних, що необхідні для точного прогнозування стану океанів.

### 4. Програмне забезпечення та алгоритми для обробки даних

Для ефективного контролю якості і забезпечення надійності даних температури та солоності важливу роль відіграють програмні засоби та алгоритми обробки, що автоматизують процес аналізу та виявлення аномалій у великих масивах даних. Завдяки використанню спеціалізованого програмного забезпечення дослідники мають можливість значно пришвидшити обробку даних, виявити можливі помилки на ранніх етапах і оптимізувати процедури контролю якості.

Одним з поширених інструментів для роботи з океанографічними даними є рекомендована МОК програма *Ocean Data View (ODV)* [14], яка дозволяє візуалізувати, обробляти та аналізувати дані. Завдяки вбудованим інструментам для побудови профілів температури та солоності, *ODV* може використовуватись для ідентифікації аномалій у вертикальних та горизонтальних розрізах водяного стовпа. Наприклад, якщо дані показують різкі зміни солоності на певній глибині, які не характерні для цього регіону, це може вказувати на помилку у вимірюваннях або аномальне явище, що потребує додаткового дослідження. Використання таких програм дозволяє швидко отримувати і візуалізувати інформацію, яка допомагає у виявленні помилок та ухваленні рішень щодо подальших коригувань.

Крім того, для аналізу великих обсягів даних часто використовуються математичні алгоритми, зокрема алгоритми часових рядів, що дозволяють відстежувати довготривалі тренди та сезонні зміни в океанографічних

параметрах. У програмному середовищі *Matlab* [15], яке широко застосовується для наукових розрахунків, можна побудувати алгоритми, які автоматично виявляють аномальні значення, порівнюючи дані з історичними показниками. Наприклад, алгоритм може виявити, що в регіоні, де зазвичай спостерігаються стабільні показники температури, раптово зафіксоване підвищення. Така інформація є цінною для своєчасного виявлення змін у морському середовищі, що можуть бути пов'язані з кліматичними аномаліями або природними явищами.

Ще одним корисним методом є алгоритми для обробки багатосарових даних, коли дані температури та солоності поєднуються з іншими параметрами, такими як глибина, тиск і час. Це дозволяє створювати детальні моделі морських середовищ і використовувати комплексний підхід до аналізу. Наприклад, у разі значних відхилень температури на великій глибині ці відхилення можуть бути підтвержені або спростовані на основі супутніх даних, таких як тиск чи електропровідність. Комплексний підхід до контролю якості, що забезпечується алгоритмами аналізу багатфакторних даних, дозволяє отримати більш точні результати й уникнути хибних інтерпретацій.

Таким чином, програмне забезпечення і алгоритми забезпечують надійний контроль за якістю даних, підвищують ефективність обробки і дозволяють науковцям фокусуватися на глибинному аналізі та інтерпретації отриманих результатів.

#### *5. Приклади використання контрольованих даних для досліджень*

Контрольовані дані температури та солоності є основою для багатьох досліджень, що спрямовані на аналіз та прогнозування океанічних процесів, а також моніторинг змін клімату. Завдяки якісним та надійним даним, дослідники можуть глибше розуміти взаємозв'язки в морському середовищі та застосовувати отримані результати для вирішення екологічних проблем і управління морськими ресурсами [4–6].

Одним із найважливіших напрямів використання контрольованих даних є оцінка змін клімату. Дані температури, зібрані у різних регіонах Світового океану, дозволяють відслідковувати зміни в океанічних течіях і термоклинах океану, які безпосередньо пов'язані зі змінами клімату. Наприклад, у рамках програми *ARGO*, що використовує автономні поплавки, зібрані дані вказують на стабільне підвищення температури поверхневих вод за останні роки, особливо в полярних регіонах. Ці спостереження є важливими для моделювання кліматичних процесів і прогнозування їх впливу на прибережні екосистеми.

Інший важливий приклад застосування якісних даних – аналіз змін океанічних течій. Течії, як відомо, відіграють значну роль у глобальній циркуляції океану, переносячи тепло та поживні речовини. Відхилення параметрів температури і солоності можуть вказувати на зміни у структурі та силі течій, що впливають на циркуляцію водних мас. Наприклад, контрольовані дані температури використовуються для аналізу Гольфстріму, який обігріває Північну Атлантику. Зміни температурних показників за останні роки вказують на ослаблення Гольфстріму, що потенційно може вплинути на клімат Європи та Північної Америки.

Якісні дані також мають вагоме значення для моніторингу стану морських екосистем та управління рибальством. Солоність є ключовим фактором, що впливає на розподіл планктону, який, у свою чергу, є основним джерелом харчування для багатьох видів риб. Завдяки точним даним дослідники можуть прогнозувати, в яких регіонах і в які періоди буде спостерігатись підвищена продуктивність біоресурсів. Наприклад, високоякісні дані про солоність та температуру дозволяють оцінити вплив солоності на нерест риб та оптимізувати зони для риболовлі, що забезпечує раціональне використання біоресурсів.

Отримані контрольовані дані також використовуються для розробки моделей і прогнозів глобальних змін клімату. Комплексний підхід, що поєднує якісні показники температури, солоності та інші океанографічні параметри, дозволяє створювати довготривалі прогнози на основі інтегрованих кліматичних моделей. Це дає можливість вчасно оцінювати ризики і розробляти адаптивні стратегії для зменшення негативних впливів на морське середовище.

Таким чином, контрольовані дані температури та солоності є основою для досліджень, що мають вирішальне значення у розумінні кліматичних і океанічних процесів. Вони допомагають не лише дослідникам, але й органам управління приймати обґрунтовані рішення для збереження і стійкого використання морських ресурсів.

## **Висновки**

Контроль якості даних параметрів температури та солоності є невід'ємною частиною сучасних океанографічних досліджень і забезпечує достовірність, точність і репрезентативність отриманих результатів. Завдяки розробленим міжнародним стандартам і протоколам, а також впровадженню новітніх технологій, таких як автоматизоване програмне забезпечення та алгоритми для обробки даних, застосування перевірених часом рекомендованих практик, дослідники мають можливість здійснювати якісний моніторинг морських середовищ. Якісні дані океанографічних параметрів, що досліджуються, є основою для моделювання океанічних процесів і прогнозування кліматичних змін, що має вирішальне значення для розробки стратегій адаптації до глобальних змін клімату.

Використання контрольованих даних про параметри температури і солоності дозволяє глибше розуміти зміни у морському середовищі та оцінювати вплив антропогенних і природних факторів на океанічні процеси. Завдяки якісним і точним вимірюванням стає можливим оцінювати стан морських екосистем, управляти морськими ресурсами і вчасно реагувати на зміни, що відбуваються в океані.

Отже, дотримання високих стандартів контролю якості та використання комплексного підходу до збору та обробки океанографічних даних є запорукою успішного проведення досліджень морського середовища та внеском у розвиток наукових знань про океан. Надійні дані, отримані завдяки контролю якості, забезпечують основні ресурси для подальших наукових відкриттів і екологічно орієнтованих управлінських рішень.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Щипцов О.А. (2022). Експериментальний зразок гідрофізичного програмно-технологічного комплексу. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*, 4(15), С. 3-24.
2. Приходнюк В.В., Тимченко Ю.А., Надутенко М.В., & Гордєєв А.Ю. (2020). Автоматизована обробка даних для оцінки гідрофізичного стану акваторій Чорного моря. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*, 2(13), С. 114-129.
3. Щипцов О.А., Гордєєв А.Ю., Стефанов Г.С., Тимчук І.В., & Федосєєнков С.Г. (2021). Неможливо керувати тим, що ще не виміряно. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*, 3(14), С. 60-70.
4. Шундель, О., & Федосєєнков, С. (2022). Створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря шляхом його математичного моделювання. *Екологічна безпека та природокористування*, 41(1), 111–120. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>
5. Лебідь, О., Охарєв, В., Федосєєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. *Екологічна безпека та природокористування*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>
6. Щипцов, О., Гордєєв, А., Лебідь, О., Охарєв, В., Теличко, Р., Федосєєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
7. Федосєєнков С.Г., & Щипцов О.О. (2023). Науково-дослідна експедиція "Дніпро–2023". *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*, 5(16), С. 74-85. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.5\(16\).2023.74-85](https://doi.org/10.37629/2709-3972.5(16).2023.74-85)
8. Morris T, Scanderbeg M, West-Mack D, Gourcuff C, Poffa N, Bhaskar TVSU, Hanstein C, Diggs S, Talley L, Turpin V, Liu Z, & Owens B. (2024). Best practices for Core Argo floats – part 1: getting started and data considerations. *Front. Mar. Sci.* 11, P.1358042. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1358042>
9. Kalluri, S., Cao C., Heidinger A., Ignatov A., Key J., & Smith T. (2021). The Advanced Very High Resolution Radiometer: Contributing to Earth Observations for over 40 Years. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102(2), P. E351–E366, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0088.1>
10. Федосєєнков С.Г. (2023). Перспективи застосування сонара Oculus M750d та підводного дрона Chasing M2 PRO при проведенні гідроакустичних досліджень морських (річкових) акваторій і підводно-технічних робіт. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*, 5(16), С. 60-67. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.5\(16\).2023.60-67](https://doi.org/10.37629/2709-3972.5(16).2023.60-67)
11. Гордєєв А.Ю. (2023). Сучасний стан політики Міжурядової океанографічної комісії ЮНЕСКО щодо управління та обміну океанографічними даними. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*, 5(16), С. 3-24. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.5\(16\).2023.3-24](https://doi.org/10.37629/2709-3972.5(16).2023.3-24)
12. PANGAEA. Data Publisher for Earth & Environmental Science. <https://pangaea.de/>
13. Mishonov A.V., Boyer T.P., Baranova O.K., Bouchard C.N., Cross S., Garcia H.E., et al. (2024). World Ocean Database 2023. C. Bouchard, Technical Ed., NOAA Atlas NESDIS 97, 206 p. [doi.org/10.25923/z885-h264](https://doi.org/10.25923/z885-h264). Retrieved from [https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/woa/WOD/DOC/wod\\_intro.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/woa/WOD/DOC/wod_intro.pdf)
14. Ocean Data View (ODV) . <http://odv.awi.de/>
15. MATLAB. <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

Стаття надійшла до редакції 18.09.2024 і прийнята до друку після рецензування 09.12.2024

## REFERENCES

1. Shhycov, O.A. (2022). Eksperymental'nyj zrazok gidrofizychnogo programno-tehnologichnogo kompleksu. *Okeanografichnyj zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovogo okeanu)*, 4(15), 3-24 [in Ukrainian].
2. Pryhodnjuk, V.V., Tymchenko Ju.A., Nadutenko, M.V., & Gordjejev, A.Ju. (2020). Avtomatyzovana obrobka danyh dlja ocinky gidrofizychnogo stanu akvatorij Chornogo morja. *Okeanografichnyj zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovogo okeanu)*, 2(13), 114-129 [in Ukrainian].
3. Shhycov, O.A., Gordjejev, A.Ju., Stefanov, G.S., Tymchuk, I.V., & Fedosejenkov, S.G. (2021). Nemozhlyvo keruvaty tym, shho shhe ne vymirjano. *Okeanografichnyj zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovogo okeanu)*, 3(14), 60-70 [in Ukrainian].
4. Shundel, A.I., & Fedoseenkov, S.G. (2022). Creation of a system of comprehensive monitoring of the aquatic environment state of the black sea by its mathematical modeling. *Environmental Safety and Natural Resources*, 41(1), 111–120. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120> [in Ukrainian].
5. Lebid, O.H., Okhariev, V.O., Fedoseienkov, S.H., Shundel, O.I., Telychko, R.I., & Klymenkov, O.A. (2023). Geoinformation technologies of environmental monitoring in the Black Sea after Kakhovska hydroelectric power plant disaster. *Environmental Safety and Natural Resources*, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144> [in Ukrainian].
6. Shyptsov, O.A., Gordeev, A.Y., Lebid, O.H., Okhariev, V.O., Telychko, R.I., Fedoseienkov, S.H., & Shundel, O.I. (2023). Information technologies for automation of hydrophysical situation modelling and forecasting in the Black Sea region. *Environmental Safety and Natural Resources*, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103> [in Ukrainian].
7. Fedosejenkov S.G., & Shhycov O.O. (2023). Naukovo-doslidna ekspedycja "Dnipro–2023". *Okeanografichnyj zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovogo okeanu)*, 5(16), 74-85. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.5\(16\).2023.74-85](https://doi.org/10.37629/2709-3972.5(16).2023.74-85) [in Ukrainian].
8. Morris, T., Scanderbeg, M., West-Mack, D., Gourcuff, C., Poffa, N., Bhaskar, T.V.S.U., Hanstein, C., Diggs, S., Talley, L., Turpin, V., Liu, Z., & Owens, B. (2024). Best practices for Core Argo floats – part 1: getting started and data considerations. *Front. Mar. Sci.* 11, 1358042. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1358042>
9. Kalluri, S., Cao, C., Heidinger, A., Ignatov, A., Key, J., & Smith, T. (2021). The Advanced Very High Resolution Radiometer: Contributing to Earth Observations for over 40 Years. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 102(2), E351–E366. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0088.1>
10. Fedosejenkov, S.G. (2023). Perspektyvy zastosuvannja sonara Oculus M750d ta pidvodnogo drona Chasing M2 PRO pry provedenni gidroakustychnyh doslidzhen' mors'kyh (richkovykh) akvatorij i pidvodno-tehnichnyh robit. *Okeanografichnyj zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovogo okeanu)*, 5(16), 60-67. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.5\(16\).2023.60-67](https://doi.org/10.37629/2709-3972.5(16).2023.60-67) [in Ukrainian].
11. Gordjejev, A.Ju. (2023). Suchasnyj stan polityky Mizhurjadovoi' okeanografichnoi' komisii' JuNESKO shhodo upravlinnja ta obminu okeanografichnymy danymy. *Okeanografichnyj zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen' Svitovogo okeanu)*, 5(16), 3-24. [https://doi.org/10.37629/2709-3972.5\(16\).2023.3-24](https://doi.org/10.37629/2709-3972.5(16).2023.3-24) [in Ukrainian].
12. PANGAEA. Data Publisher for Earth & Environmental Science. <https://pangaea.de/>
13. Mishonov, A.V. et al. (2024). World Ocean Database 2023. C. Bouchard, Technical Ed., NOAA Atlas NESDIS 97, 206 p. [doi.org/10.25923/z885-h264](https://doi.org/10.25923/z885-h264). Retrieved from [https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/woa/WOD/DOC/wod\\_intro.pdf](https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/woa/WOD/DOC/wod_intro.pdf)
14. Ocean Data View (ODV) . Retrieved from <http://odv.awi.de/>
15. MATLAB. Retrieved from <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

*The article was received 18.09.2024 and was accepted after revision 09.12.2024*



**Гордєєв Антон Юрійович**

доктор географічних наук, старший науковий співробітник відділу океанографії Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

**Адреса робоча:** Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7263-0525> **e-mail:** drangoru@gmail.com

**Федосєнков Сергій Генадійович**

кандидат геологічних наук, в.о. директора Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

**Адреса робоча:** Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> **e-mail:** 22lex22s@ukr.net

**Шундель Олексій Іванович**

кандидат фізико-математичних наук, завідувач відділу гідроакустичних досліджень Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

**Адреса робоча:** Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> **e-mail:** lixyta666@gmail.com

**Щипцов Олександр Олександрович**

кандидат юридичних наук, старший науковий співробітник відділу океанографії Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0008-3374-1012> **e-mail:** ss0806365@gmail.com

**Невєрова Світлана Іванівна**

науковий співробітник відділу гідроакустичних досліджень Державної установи «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України»

**Адреса робоча:** Україна, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 42, лабораторний корпус В  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-7472-4776> **e-mail:** sidzp2019@gmail.com

© Авторські і суміжні права належать авторам окремих публікацій, Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київському національному університету будівництва і архітектури.

Copying © 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 17x26 см.

Усі формули мають бути набрані в редакторі MathType.

Ілюстрації повинні обов'язково нумеруватися, мати книжкову орієнтацію і не можуть перевищувати за розміром задану сторінку (параметри сторінки 17x26 см з полями 2,0 см). Перелік літературних джерел перекладається англійською мовою (або транслітерується в романському алфавіті) і подається відповідно до міжнародного стандарту оформлення наукових публікацій **APA (American Psychological Association) style** загальним списком у кінці статті за чергою посилань у тексті.

Наприкінці статті наводиться коротка довідка про авторів, де вказуються прізвище, повне ім'я та по батькові авторів, науковий ступінь, вчене звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, особисті дані кожного з авторів (адреса, місто, країна, контактний телефон, e-mail), ORCID ID.

Обов'язково слід надати електронну версію статті в редакторі Microsoft Word.

Усі представлені в редакцію рукописи проходять ретельне багатоланкове рецензування відповідними фахівцями за профілем статті. Якщо сумарна оцінка рецензентів менша за встановлений поріг, рукописи відхиляються.

Зміст статті та якість написання або перекладу (українською або англійською мовами) переглядаються коректорами збірника, проте відповідальність за зміст та якість статті несуть автори матеріалу. До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.

Розділ збірника, до якого буде віднесена стаття, визначається редакцією, узгоджується – головним редактором або його заступником. Остаточний висновок щодо публікації матеріалів схвалює редакційна колегія збірника.

Електронна версія збірника, правила оформлення та вимоги до статей містяться в Інтернеті на сайті <http://www.es-journal.in.ua>, який систематично оновлюється.

Збірник наукових праць також представлений на сайті Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського, на сайті Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України <http://itgip.org/> у розділі «Видавнича діяльність» та на сайті бібліотеки Київського національного університету будівництва і архітектури <http://library.knuba.edu.ua/node/883>.

*Редактор – В.П. Берчун*

---

Надруковано в ТОВ «Видавництво «Юстон»  
01034, м. Київ, вул. О. Гончара, 36а.  
Тел.: (044) 360-22-66  
[www.yuston.com.ua](http://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 26.12.24 Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 14.88  
Обл.-вид. арк. 11.36 Тираж 300 примірників  
Замовлення № \_\_\_\_\_

---

КИЇВ 2024