

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 48

2023

**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 (48), жовтень – грудень 2023 р.

Заснований у 2008 р.  
Виходить 4 рази на рік

---

**Academic journal**

Issue 4 (48), October – December 2023

Founded in 2008  
The journal is published 4 times a year

**КИЇВ 2023**

---

**KYIV 2023**

**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 № 16 від 19.12.2023)

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

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 14146-3117 Р від 27.05.2008 р.Електронна версія збірника в Інтернеті  
<http://www.es-journal.in.ua> українською  
та англійською мовами

Creative Commons «Attribution» 4.0 WorldWide

## ЗМІСТ

### ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ

<b>Кривомаз Т.І., Чалий І.Г., Гамоцький Р.О., Ільченко І.С., Циба А.М.</b> Критерії ESG у зеленій відбудові України.....	5
<b>Маршалл Д.І., Шевчук Я.В.</b> Оцінка визначення параметрів забруднення підземних вод із зруйнованих меліоративних споруд, хвостосховищ та затоплених сміттєзвалищ.....	21
<b>Петльований М.В., Сай К.С., Попович В.В., Чебанов М.О.</b> Методичний підхід до визначення перспективних систем «кар’єрні пустоти – закладний матеріал» на території України.....	32
<b>Богомаз О.П., Костенко В.К., Таврель М.І., Главатських К.М.</b> Аналіз потенціалу міста Покровськ щодо накопичення та використання атмосферних опадів.....	48
<b>Лаврухіна К.О.</b> Кластери в промислових екосистемах – нові інноваційні тренди розвитку повоєнної України.....	62
<b>Jafarov V.I.</b> The effect of using of organic and mineral origin raw materials in agriculture on soil fertility.....	74
<b>Кірієнко П.Г., Варламов Є.М., Квасов В.А., Лобов С.О.</b> Організація моніторингу за станом атмосферного повітря у м. Харків...	81

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

<b>Яковлев Є.О., Рогожин О.Г., Стефанишин Д.В., Крета Д.Л.</b> Регіональні еколого-геологічні наслідки підриву Каховського гідровузла в контексті вибору варіанту його відновлення.....	91
--	----

### ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

<b>Трофимчук О.М., Іцкович В.Є.</b> Метод обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих через сервіс-орієнтовану мережу...	117
<b>Лебідь О.Г., Охарєв В.О., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І., Теличко Р.І., Клименков О.А.</b> Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС...	130
<b>Триснюк Т.В.</b> Дистанційні методи дослідження оцінки впливу сільськогосподарських процесів на екологічну безпеку території.....	145
<b>Терентьєв О.М., Присянкін Д.І.</b> Удосконалення методики програмування урожаю зернових з використанням інформаційної технології комп’ютерного моделювання .....	152
<b>Khodnevyh Y., Stefanyshyn D.</b> Do we need a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute roughness coefficient?.....	170
<b>ДО ВІДОМА АВТОРІВ.....</b>	183

## CONTENTS

### ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

<b>Kryvomaz T., Chaliy I., Hamotskyi R., Ilchenko I., Tsyba A.</b> ESG criteria in green rebuilding of Ukraine.....	5
<b>Marshall D., Shevchuk Ya.</b> Assessment of the determination of groundwater pollution parameters from destroyed ameliorative structures, tail storage and flooded landfills.....	21
<b>Petlovanyi M., Sai K., Popovych V., Chebanov M.</b> Methodological approach to determining promising “quarry cavities – backfill material” systems on the territory of Ukraine.....	32
<b>Bohomaz O., Kostenko V., Tavrel M., Hlavatskykh K.</b> Analysis of the potential of the city of Pokrovsk for the accumulation and use of atmospheric precipitation.....	48
<b>Lavrukhina K.</b> Clusters in industrial ecosystems – new innovative trends in the development of post-war Ukraine.....	62
<b>Jafarov V.I.</b> The effect of using of organic and mineral origin raw materials in agriculture on soil fertility.....	74
<b>Kyriienko P., Varlamov Ye., Kvasov V., Lobov S.</b> Organization of atmospheric air monitoring in Kharkiv.....	81

### CIVIL SAFETY

<b>Yakovlev Ya., Rogozhin O., Stefanyshyn D., Kreta D.</b> Geocological and economic consequences of creation, drainage and possible variants of restoration the Kakhovsky reservoir.....	91
---	----

### INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

<b>Trofymchuk O., Itskovych V.</b> Method of processing information about the state of the environment based on data obtained through a service-oriented network...	117
<b>Lebid O., Okhariyev V., Fedoseienkov S., Shundel O., Telychko R., Klymenkov O.</b> Geoinformation technologies of environmental monitoring in the Black Sea after Kakhovska hydroelectric power plant disaster.....	130
<b>Trysnyuk T.</b> Remote methods of research assessment of the impact of agricultural economic processes on the environmental destruction of the territory	145
<b>Terentiev O., Prosyankin D.</b> Improvement of cereal harvest programming methods using computer simulation information technology.....	152
<b>Khodnevykh Y., Stefanyshyn D.</b> Do we need a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute roughness coefficient?.....	170
<b>INFORMATION FOR AUTHORS</b> .....	183

# ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА ОСНОВИ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ ENVIRONMENTAL SAFETY AND NATURAL RESOURCES

UDC 504.064.2

**Tetiana Kryvomaz<sup>1</sup>**, Doctor of Technical Sciences, Candidate of Biological Sciences, Professor of the Department of Environmental Protection Technologies and Labor Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4161-9702> **e-mail:** ecol@i.ua

**Ivan Chaliy<sup>2</sup>**, PhD in Economics, Chairman of the Accounting and Reporting Practice Committee  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5537-2707> **e-mail:** ifrs@ukr.net

**Roman Hamotskyi<sup>1</sup>**, PhD student  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5469-8606> **e-mail:** roman.gamotskii@gmail.com

**Igor Ilchenko<sup>1</sup>**, PhD student  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0427-138X> **e-mail:** revolenglab@gmail.com

**Artem Tsyba<sup>1</sup>**, PhD student  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4532-0982> **e-mail:** absqueee@gmail.com

<sup>1</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Ukrainian Federation of Professional Accountants and Auditors, UA NvD Platform, Kyiv, Ukraine

## ESG CRITERIA IN GREEN REBUILDING OF UKRAINE

**Abstract.** *The historical retrospective of the construction industry shows a tendency to move to a qualitatively new level after crises and global upheaval. Global markets are currently being reformatted to reflect new investment priorities, where environmental, social and governance (ESG) criteria are gaining essential importance, and Ukraine is at the center of global transformations. Ukraine's post-war reconstruction plans include the use of green innovative technologies, as the formation of a green economy is the basis of the European Union Association Agreement. The concept of "green recovery" has become widespread, as investments in low-carbon technologies strengthen the country's resilience. Implementation of green building principles saves resources and energy, stimulates innovation and competitiveness, and increases the confidence of investors and increasingly conscious consumers. Current international trends are moving towards global decarbonization of the world economy and the widespread implementation of ESG non-financial reporting standards to screen and increase transparency of business. The construction sector plays a key role in achieving the Sustainable Development Goals, given the significant economic, environmental and social impacts of the construction industry. The requirements for decarbonization, safety and well-being of buildings are growing, and the increasing volume and complexity of data requires new tools and approaches. The application of ESG principles involves the creation of long-term sustainable value in the interests of the company and its stakeholders. In the construction sector, ESG*

factors are crucial for determining the overall value and potential of a property, which helps investors to obtain more information for decision-making and risk assessment. The use of (ESG) indicators ensures transparency, objectivity and measurability of the company's performance. Businesses that demonstrate concrete commitments to sustainable development will become undisputed leaders in their industries in the next 30 years and will gain access to investment capital. On the other hand, companies that do not take care of compliance with international standards in a timely manner risk losing business in the medium term.

**Key words:** ESG; green building; reconstruction of Ukraine; environmental safety.

**Т.І. Кривомаз<sup>1</sup>, І.Г. Чалий<sup>2</sup>, Р.О. Гамоцький<sup>1</sup>, І.С. Ільченко<sup>1</sup>, А.М. Ціба<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Федерація професійних бухгалтерів та аудиторів України, UA NvD Platform, м. Київ, Україна

## **КРИТЕРІЇ ESG У ЗЕЛЕНІЙ ВІДБУДОВІ УКРАЇНИ**

**Анотація.** *Історична ретроспектива розвитку будівельної галузі свідчить про тенденцію переходу на якісно новий рівень після криз та глобальних потрясінь. Зараз відбувається переформатування світових ринків з урахуванням нових інвестиційних пріоритетів, де екологічні, соціальні та управлінські критерії діяльності бізнесу (ESG) набувають есенціальної вагомості, а Україна опинилася у центрі світових трансформацій. Плани повоєнної відбудови України передбачають використання зелених інноваційних технологій, оскільки формування зеленої економіки є основою Угоди про асоціацію з ЄС. Широкого поширення набула концепція «зеленого відновлення», тому що інвестиції у низьковуглецеві технології зміцнюють стійкість країни. Впровадження принципів зеленого будівництва забезпечує економію ресурсів та енергії, стимулює інновації та конкурентоспроможність, підвищує довіру інвесторів та все більші свідомих споживачів. Сучасні міжнародні тренди розвиваються у напрямку глобальної декарбонізації світової економіки та широкомасштабного впровадження ESG стандартів нефінансової звітності для скринінгу та збільшення прозорості економічної діяльності. Сектор будівництва відіграє ключову роль у забезпеченні цілей сталого розвитку, враховуючи значні економічні, екологічні та соціальні наслідки будівельної сфери. Вимоги до декарбонізації, безпеки та благополуччя будівель зростають, а збільшення обсягу та складності даних вимагає нових інструментів і підходів. Застосування принципів ESG передбачає створення довгострокової сталої цінності в інтересах компанії та її стейкхолдерів. У сфері будівництва фактори ESG мають вирішальне значення для визначення загальної вартості та потенціалу об'єкта нерухомості, що допомагає інвесторам отримувати більше інформації для прийняття рішень та оцінки ризиків. Застосування (ESG) показників забезпечує прозорість, об'єктивність та вимірюваність результатів діяльності компанії. Бізнеси, які демонструють конкретні зобов'язання щодо сталого розвитку, стануть беззаперечними лідерами у своїх галузях у найближчі 30 років та отримають доступ до інвестиційного капіталу. Натомість, компанії, які не подбають вчасно про відповідність міжнародним стандартам, ризикують втратити бізнес вже у середньостроковій перспективі.*

**Ключові слова:** ESG; зелене будівництво; відбудова України; екологічна безпека.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.5-20>

## Вступ

Російська агресія зруйнувала долі та домівки українців, проте впевненість у перемозі України настільки непохитна, що відновлення України відбувається вже зараз. Глобальні плани з відбудови нашої країни почали з'являтися ще у перші місяці війни і з кожним днем до них долучаються все більше людей і організацій з різних країн світу. Загалом у планах відбудови України виділяють три основних етапи: 1) забезпечення житлом всіх постраждалих; 2) відновлення інфраструктури; 3) відбудова зруйнованих територій за кращими міжнародними стандартами [1]. Впровадження принципів зеленого будівництва забезпечує економію ресурсів та енергії, стимулює інновації та конкурентоспроможність, підвищує довіру інвесторів та все більш свідомих споживачів [3].

Формування зеленої економіки в Україні є основою Угоди про асоціацію з ЄС, а сприяння зеленому та сталому відновленню після пандемії COVID-19 стало ключовою сферою підтримки ПРООН Уряду України. Перехід до зеленої економіки та кліматичної нейтральності відповідно до вимог ЄС буде пов'язаний з необхідністю відмовитися від старої та неефективної вуглецевої економічної діяльності шляхом розробки та впровадження абсолютно нових бізнес-моделей. Ця нова бізнес-модель має базуватися на низькому вмісті вуглецю у продуктах і послугах, що вимагає впровадження системи моніторингу, звітності та верифікації (МЗВ) та кращого управління ризиками, пов'язаними зі змінами клімату. Проект ПРООН «Підтримка зеленого відновлення в Україні» надаватиме підтримку при оцінці впливу на українську економіку та фінансову систему нефінансових ризиків, спричинених розвитком ESG [4].

Сектор будівництва відіграє ключову роль у забезпеченні цілей сталого розвитку, враховуючи значні економічні, екологічні та соціальні наслідки протягом всього життєвого циклу будівельних об'єктів [5]. Ініціативою #BuildingToCOP26 створено Консорціум за нульові викиди та стійке середовище, де заплановано вдвічі скоротити викиди будівельного сектору до 2030 року та зробити побудоване середовище основним постачальником рішень для боротьби з кліматичною кризою [9]. Асоціація фінансових ринків Європи (AFME) відзначає суттєвий вплив на ринки капіталу регуляторних змін у сфері сталого фінансування через попит клієнтів та очікування різних сфер бізнесу. Група фінансових установ, які володіють майже 20 трлн доларів активів, закликала компанії встановити науково обґрунтовані цілі щодо скорочення викидів парникових газів – SBTi (scientific based targets initiative). Понад 2000 компаній, які покривають 2 трлн ринкової капіталізації, задекларували прагнення встановити SBT для скорочення понад 90% власних викидів парникових газів та компенсації чи усунення залишкових до 2050 р. [16]. У 1200 компаній, які представляють 1/3 світової економіки з понад 50 секторів, є підтверджені SBT. Дев'ять із 10 компаній зі списку Fortune 500 використовують GHG протокол для CDP звітів (Carbon Disclosure Project – «золотий» стандарт екологічної звітності) [17]. Фінансові консультанти враховують такі ризики у своїх інвестиційних рішеннях та страхових чи інвестиційних консультаціях. Прийняття регламенту наразі означає, що певні учасники фінансового ринку в ЄС зобов'язані здійснювати обов'язкове розкриття інформації про екологічне, соціальне та корпоративне управління



(ESG), та заохочує інвесторів виявляти, оцінювати та пом'якшувати потенційний негативний вплив своїх інвестицій на суспільство та довкілля.

Сучасні міжнародні тренди розвиваються у напрямку глобальної декарбонізації світової економіки та широкомасштабного впровадження ESG стандартів, що невдовзі стануть обов'язковими для ведення бізнесу, в тому числі і в Україні. Ще у 2018 році виникла необхідність розробки Плану дій ЄС щодо фінансування сталого зростання. Зараз учасники ринків капіталу впроваджують Регламент ЄС про таксономію як інструмент скринінгу економічної діяльності та збільшення прозорості. Очікується, що остаточне затвердження стандартів звітності ЄС разом із майбутнім впровадженням CSRD (Corporate Sustainability Reporting Directive) покращать доступність ESG інформації, допомагаючи відповідати вимогам Положення про розкриття інформації щодо сталого фінансування. У Великій Британії нові правила щодо обов'язкових вимог до розкриття інформації про викиди парникових газів почали діяти ще з 1 квітня 2019 р. У листопаді 2022 р. Рада ЄС ухвалила Директиву про корпоративну звітність зі сталого розвитку (CSRD) за новою версією Європейських стандартів сталої звітності (ESRS) Європейської консультативної групи з фінансової звітності (EFRAG). Екологічні, соціальні та управлінські (ESG – Environmental, Social, and Governance) критерії діяльності бізнесу – це набір стандартів нефінансової звітності компаній ESRS (European Sustainability Reporting Standards), опубліковані в квітні 2022 року [10]. Першими під дію Директиви про нефінансову звітність підпадають великі компанії зі штатом понад 500 працівників, що повинні звітувати за результатами 2024 р. з 1 січня 2025 р. Директива поширюється на компанії з більш ніж 250 працівниками та/або 40 мільйонами євро обороту та/або 20 мільйонами євро загальних активів. Малі та середні підприємства матимуть більше часу для адаптації до нових правил, оскільки вони повинні подавати звітність у 2027 р. за результатами своєї діяльності з 1 січня 2026 р. Затверджена у червні 2022 р. Директива щодо корпоративної звітності про сталий розвиток (CSRD) змінює та значно розширює вимоги ЄС щодо звітності. Окрім вимоги до компаній ЄС звітувати відповідно до Європейських стандартів звітності про сталий розвиток, CSRD Директива також включає компанії поза межами ЄС, якщо вони генерують значний дохід і мають співробітників, наприклад, є дочірньою компанією в ЄС.

У сфері будівництва фактори ESG мають вирішальне значення для визначення загальної вартості та потенціалу об'єкта нерухомості, що допомагає інвесторам отримувати більше інформації для прийняття рішень та оцінки ризиків. Бізнеси, які демонструють конкретні зобов'язання щодо сталого розвитку, стануть беззаперечними лідерами у своїх галузях у найближчі 30 років та отримають доступ до інвестиційного капіталу. Натомість, компанії, які не подбають вчасно про відповідність міжнародним стандартам, ризикують втратити бізнес вже у середньостроковій перспективі.

## **Постановка завдання**

Метою цього дослідження є з'ясування ролі ESG критеріїв у зеленій відбудові України. У відповідності із поставленою метою сформульовано наступні завдання:

- проаналізувати етапи еволюції від ідеології зеленої концепції до вимірюваних параметрів ESG звітності;
- охарактеризувати екологічні (Environmental), соціальні (Social) та управлінські (Governance) вимоги діяльності будівельних організацій;
- визначити перспективи розвитку будівельної галузі України з урахуванням ESG вимог.

## Результати досліджень

Тенденції будівництва завжди відображали здатність еволюціонувати після криз шляхом докорінного перегляду теорій планування та розробки нових моделей міського простору, а також нових шляхів функціонування людей у побудованому середовищі. Історична ретроспектива розвитку будівельної галузі свідчить про тенденцію переходу на якісно новий рівень після криз та глобальних потрясень.

Широкого поширення набула концепція «зеленого відновлення», підґрунтя для якої сформувалося ще в ході розробки протипандемічних заходів в різних містах світу. Всі зацікавлені сторони вже розуміють, що інвестиції у низьковуглецеві технології – це інвестиції у стійкість країни. Зміна клімату збільшила ризик аномальних погодних явищ – спека, повені, пожежі, урагани, шторми та інше, тому всі шукають способи пом'якшити ці ризики. Енергетична криза обумовлює енергоефективність та використання відновлюваних джерел енергії, а війна переконливо продемонструвала, що енергонезалежність – це питання виживання. Економічна криза обумовлює пошук зовнішнього фінансування та інвестицій. Після спаду ринків внаслідок війни та Covid-19 динаміка показників вартості акцій компаній, що приділяють належну увагу питанням ESG, була кращою, порівнюючи з іншими компаніями [2]. Зараз відбувається переформатування світових ринків з появою нових інвестиційних пріоритетів, де ESG набуває есенціальної вагомості, а Україна опинилася у центрі світових трансформацій. Криза може стати поштовхом для переходу на новий рівень, якщо у повоєнній відбудові застосувати кращі світові тенденції розвитку будівельної галузі (рис. 1).

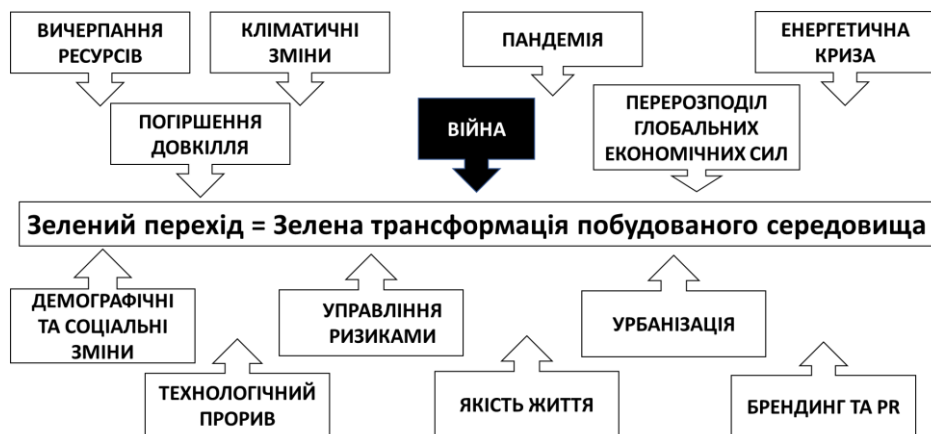


Рис. 1. Підґрунтя для зеленої відбудови України

Витоки концепції зеленого будівництва можна простежити від середини XIX століття. Головною метою цих раних розробок було покращення умов експлуатації та обслуговування будівель. Після першої світової війни в 1921 р. у Британії було засновано науково-дослідний центр будівництва (Building Research Establishment – BRE). Досліджувались шляхи покращення якості житла після війни, вплив опалення та теплоізоляції на якість життя та вартість енергії для пересічного громадянина, а також визначали дію англійського клімату на будівельні матеріали. У повоєнний час після другої світової війни у 1949 р. перед BRE було поставлено завдання покращити сталість будівельних ресурсів Британії з суто економічної точки зору, однак при цьому не враховувався вплив на довкілля.

Сучасне поняття про зелене будівництво сформувалося в процесі екологічного руху 1960-х років і кристалізувалося під час нафтової кризи 1970-х років, яка змусила компанії з нерухомості шукати альтернативи викопному паливу внаслідок ембарго ОПЕК. У 1973 році Американський інститут архітекторів започаткував Енергетичний комітет для лобювання в уряді США принципів будівництва, які включали екологічні та енергетичні міркування. Сьогодні зелене будівництво застосовує інноваційні технології для мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище будівельної індустрії шляхом оптимізації використання природних ресурсів, зменшення забруднення, впровадження енергоефективності, підвищення якості та комфорту побудованого середовища. Постійно з'являються нові «золоті стандарти», які перевершують попередні, але збільшення обсягу та складності даних вимагає нових інструментів і підходів. Водночас вимоги до декарбонізації, безпеки та благополуччя продовжують зростати, а очікування стають більш масштабними та конкретними. Застосування ESG показників забезпечує прозорість, об'єктивність та вимірюваність результатів діяльності компанії.

Основною метою діяльності будь-якої компанії є максимізація прибутку, а бізнес є рушійною силою економічного зростання суспільства. Водночас бізнес і промисловість негативно впливають на навколишнє середовище та якість життя, тому розвиток природоохоронного та соціального законодавства спрямовано на пом'якшення цього руйнівного ефекту. Часи «розгнужданого капіталізму» вже залишилися у минулому, а прагнення до прибутку за будь-яку ціну може назавжди зруйнувати репутацію і бізнес. Соціально-свідомі інвестори для перевірки потенційних інвестицій використовують ESG стандарти діяльності компанії. Застосування принципів ESG передбачає створення довгострокової сталої цінності в інтересах компанії та її стейкхолдерів.

Наразі немає єдиного стандарту звітності з питань ESG, як і уніфікованої методики збору і надання інформації. У міжнародній системі сформувалося два основних центри ESG-стандартизації на базі Європейської консультативної групи з фінансової звітності [9] та Фундація міжнародних стандартів фінансової звітності (МСФЗ) [14]. Фундація МСФЗ об'єднує Міжнародну раду стандартів сталого розвитку (ISSB – International Sustainability Standards Board) і Раду з міжнародних стандартів фінансової звітності (IASB – International Accounting Standards Board). Над розробкою ESG стандартів також працюють Проєкт розкриття про викиди вуглецю [5], Рада стандартів розкриття інформації про клімат [6], Рада зі стандартів обліку сталого розвитку [16], Цільова група з питань розкриття кліматичної

фінансової інформації [17]. Наразі Глобальна ініціатива звітування (GRI) [12] є найбільш широко використовуваним стандартом звітності ESG у діловому світі. На міжнародному рівні існує тенденція до надання незалежних підтверджень достовірності нефінансової звітності, якій повністю довіряють акціонери, стейкхолдери та ринки.

Таблиця 1. Проект стандартів нефінансової звітності компаній ESRS (European Sustainability Reporting Standards)

<b>Наскрізнi стандарти</b>	<b>Екологічні стандарти</b>	<b>Соціальні стандарти</b>	<b>Управлінські стандарти</b>
Загальні принципи Загальна оцінка, стратегія, управління та суттєвість	Зміна клімату Забруднення Водні та морські ресурси Біорізноманіття та екосистеми Використання ресурсів та циркулярна економіка	Власна робоча сила Працівники в ланцюжку створення вартості Вплив на громади Споживачі та кінцеві користувачі	Управління, управління ризиками та внутрішній контроль Ділова поведінка

Нефінансова звітність повинна складатися згідно з відповідними національними та/або загально визнаними міжнародними стандартами звітності з питань ESG. В Україні керівні принципи розкриття інформації з питань ESG розроблялися навесні 2020 року під егідою Національної комісії з цінних паперів та фондового ринку України (НКЦПФР) та Української академії корпоративного управління (УАКУ). Розроблений Кодекс корпоративного управління охоплює широке коло питань, зокрема роль стейкхолдерів підприємства та сприяння сталому розвитку підприємства. Кодекс дотримується Принципів корпоративного управління G20/OECP та відображає рекомендації, наведені в остаточних звітах з питань корпоративного управління та сталого фінансування на ринках, що розвиваються, Комітету з розвитку та ринків, що розвиваються, Міжнародної організації комісій з цінних паперів (IOSCO). Рекомендації щодо розкриття інформації відповідають керівним принципам щодо належної практики розкриття інформації про корпоративне управління Конференції Організації Об'єднаних Націй з торгівлі та розвитку (UNCTAD). Також використовувались Методика IFC з питань корпоративного управління та національні кодекси різних країн [2]. Зважаючи на задекларований владою намір про приєднання України до ЄС, вважаємо, що наразі українським компаніям доцільно орієнтуватися на стандарти нефінансової звітності компаній ESRS (European Sustainability Reporting Standards), проект яких було опубліковано у квітні 2022 року (табл. 1). У Проекті передбачено близько 1100 розкриттів широкого спектру ESG звітності не тільки перед інвесторами, але й для всіх зацікавлених сторін.

Вплив компанії на суспільство та навколишнє середовище повинен бути чітко зрозумілим для стейкхолдерів. Екологічні критерії (Environmental) враховують корпоративну політику компанії у реагуванні бізнесу на екологічні ризики та у захисті навколишнього середовища та визначають, як саме компанія дбає про довкілля. Соціальні критерії (Social) регламентують відносини зі співробітниками, постачальниками, клієнтами та суспільством.

Корпоративне управління (Governance) стосується керівництва компанією, оплати праці, аудиту, внутрішнього контролю та прав акціонерів. Показники ефективності ESG можуть бути як кількісними, так і якісними. Кожній компанії необхідно з'ясувати сфери ESG та скоригувати механізми контролю та внутрішнього аудиту з їх урахуванням. В першу чергу зосереджуються на ESG показниках, які суттєві для інвесторів та ключових стейкхолдерів.

**Екологічні критерії ESG звітності.** Європейський закон про клімат встановлює межі для скорочення викидів парникових газів з метою скорочення викидів до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [5]. Рада з питань фінансової стабільності (РФС/FSB) створила Робочу групу з питань розкриття фінансової інформації, пов'язаної з кліматом (РГРІК/TCFD), для розкриття інформації про кліматичні ризики та можливості. Регламент (ЄС) щодо кліматичної таксономії (EU Taxonomy Climate Delegated Act) встановлює шість екологічних цілей: 1) пом'якшення наслідків зміни клімату; 2) адаптація до змін клімату; 3) стале водокористування та захист водних і морських ресурсів; 4) перехід до циркулярної економіки; 5) запобігання забрудненню і контроль за ним; 6) охорона та відновлення біорізноманіття та екосистем. Крім того, Положення про таксономію встановлює чотири умови відповідності економічної діяльності екологічним критеріям: 1) зробити значний внесок принаймні в одну екологічну мету; 2) не завдавати суттєвої шкоди іншим екологічним цілям (DNSH – do no significant harm); 3) дотримуватись мінімальних соціальних гарантій; 4) відповідати технічним критеріям перевірки. Компаніям рекомендовано розробити Політику сталого розвитку, яка визначає взаємодію з навколишнім середовищем, а також враховує потенційні ризики, пов'язані з довкіллям. Обов'язково не тільки дотримуватись усіх відповідних законів, але й поширювати інформацію щодо кращих практик сталого розвитку та впроваджувати у діяльність компанії. Ініціатива щодо встановлення науково обґрунтованих кліматичних цілей (Science Based Targets initiative) заохочує компанії до збільшення обсягу розкриття інформації про сталий розвиток, створення планів покращення сталого розвитку та надання продуктів і послуг на основі нейтральних вуглецевих викидів. Провідні корпорації вже зараз вимагають від своїх постачальників розкривати дані про сталий розвиток та викиди парникових газів, а також надавати підтвердження їхньої достовірності від третіх сторін. Для будівельних компаній рекомендовано враховувати у своїй діяльності наступні екологічні критерії:

1. Наявність системи передпроектної оцінки впливу будівництва на довкілля та розвиток місцевих громад з урахуванням інтересів всіх груп зацікавлених осіб.

2. Проведення комплексної оцінки життєвого циклу будівель для мінімізації негативного впливу на довкілля та кліматичні зміни.

3. Відновлення антропогенно та техногенно пошкоджених територій для нової забудови.

4. Практика відповідального землекористування, збереження ландшафтних особливостей та біорізноманіття в процесі проектування, будівництва, експлуатації та реконструкції будівель та інфраструктури.

5. Дотримання вимог безпеки, якості та екологічної естетики будівель для забезпечення здоров'я і комфорту користувачів.

6. Застосування енергоефективних інноваційних технологій та стратегій зниження експлуатаційних витрат.

7. Відповідальний вибір будівельних матеріалів з урахуванням екологічних вимог та ланцюгів постачання.

8. Наявність змістовної нефінансової інформації про кліматичні ризики, зокрема даних про викиди парникових газів.

**Соціальні критерії ESG звітності.** Соціальні критерії орієнтовані на відносини з працівниками, постачальниками, клієнтами, місцевими громадами та ін. Компанія повинна провести аналіз різних груп стейкхолдерів, на яких може вплинути діяльність компанії або які можуть вплинути на господарську діяльність компанії, щоб розробити стратегії взаємодії з ними для конструктивної співпраці. Стейкхолдери повинні мати можливість вільно повідомляти про своє занепокоєння щодо протиправної чи неетичної практики у компанії, для чого необхідно створити канали комунікацій та механізми подання й розгляду скарг. Взаємодія зі стейкхолдерами означає широкий, інклюзивний та безперервний процес, в якому розкриваються інтереси основних груп стейкхолдерів та здійснюється відкрите звітування щодо аспектів взаємодії з ними. Врахування інтересів стейкхолдерів допомагає компанії покращити свою діяльність і краще управляти своїми ризиками. Усвідомлення ролі стейкхолдерів в економічному житті підприємства є взаємовигідним процесом, оскільки фінансові результати діяльності і профіль ризику компаній покращуються, якщо компанії повністю розуміють внесок стейкхолдерів у їхню діяльність і докладають зусиль для налагодження конструктивної взаємодії з ними. При цьому покращення безпеки праці робітників не лише зменшує кількість потенційно можливих судових позовів, а й підвищує мотивацію і продуктивність працівників.

Таким чином компанія формує власну політику, кодекс, стратегію та план взаємодії зі стейкхолдерами для досягнення спільних інтересів. Згідно з Директивою ЄС щодо нефінансової звітності [15], починаючи з 2018 року, підприємства, що становлять суспільний інтерес, повинні публікувати звіти про свою політику стосовно дотримання прав людини, соціальної відповідальності та ставлення до працівників, протидії корупції та хабарництва, різноманітності співробітників за віком, статтю, освітою та професійним досвідом [2]. Політика різноманітності, справедливості та інклюзивності (DEI – diversity, equity, and inclusion) спрямована на дотримання справедливості для всіх людей, особливо груп, які історично були недостатньо представлені або піддавалися дискримінації на основі ідентичності чи інвалідності [8]. Звітність з питань прав людини у сфері бізнесу регламентують Керівні принципи концепції звітності ООН (КПКЗ/UNGP). Для оцінки відповідності соціальної політики компанії рекомендовано наступні критерії:

1. Дотримання прав людини, соціальна відповідальність та гідне ставлення до працівників.

2. Неприпустимість практики незаконного використання робочої сили, а саме праці робітників, з якими не оформлені трудові або цивільно-правові стосунки. Недопущення практики незаконної оплати праці, тобто «зарплата в конвертах».

3. Різноманітність у складі компанії за віком, статтю, освітою та професійним досвідом. Відсутність свідчень про токсичність робочих місць, включаючи сексуальні домагання.

4. Відсутність фактів залучення підприємства у репутаційні скандали і конфлікти з територіальними громадами та громадськими організаціями, зокрема – незаконне землевідведення, руйнація пам'яток архітектури тощо.

5. Філантропічна залученість, зокрема благодійні та волонтерські заходи.

6. Політика взаємодії зі стейкхолдерами повинна ґрунтуватися на прозорості та інклюзивності.

7. Кодекс корпоративної поведінки, який узгоджується з більш широкими цілями фінансової стабільності та сталого розвитку.

8. Механізм подання та розгляду скарг через канали комунікації для стейкхолдерів.

**Критерії управління ESG звітності.** Критерії управління обґрунтовують впровадження передової практики ESG, яка поширюється на керівництво, співробітників, зовнішній аудит та внутрішній контроль компанії. Керівні принципи ESG впроваджуються в усіх ланках управління організацією на засадах справедливості та прозорості з урахуванням кращих практик і культури належного управління. Компанія повинна переглянути кваліфікаційні вимоги та посадові інструкції, щоб вони містили знання і досвід з питань ESG. Кваліфікаційні вимоги передбачають знання у сфері управління екологічними і соціальними ризиками, корпоративної соціальної відповідальності, сталого розвитку, практик належного управління і запобігання корупції. Політика щодо розкриття інформації повинна вимагати звітування з питань, пов'язаних зі стейкхолдерами і сталим розвитком, які є суттєвими для фінансових результатів діяльності компанії. Компанія повинна визначити суттєвість будь-якої інформації, яка може покращити розуміння господарської діяльності компанії у сфері ESG. Концепція суттєвості щодо звітності з питань ESG забезпечує глибше, довгострокове розуміння ризиків, перспектив та рушійних сил успіху компанії. Команда організації повинна бути компетентною, досвідченою, незалежною та різноманітною за складом і водночас діяти на поінформованій основі, застосовуючи сучасні знання та навички стосовно ESG. Інтеграція менеджменту екологічних та соціальних ризиків у системи управління відкриває можливості, зокрема, нові напрямки бізнесу, нові клієнти, більший доступ до фінансування, вища акціонерна вартість та покращена репутація і гудвіл. Дотримання високих стандартів корпоративного управління сприяє фінансовому зростанню, оскільки компанії, які мають високі показники ESG, мають вищу вартість акцій [19]. Вся інформація, призначена для акціонерів, ринків та інших стейкхолдерів, має бути структурованою і легкодоступною на вебсайті компанії. Політика щодо управління та розкриття інформації визначає своєчасний і справедливий доступ до показників ESG, що включає наступні критерії:

1. Корпоративна стратегія і політика з питань ESG, що включають мету, місію та бачення сталого розвитку компанії, основні питання і виклики у сфері ESG, плани щодо їх вирішення, зв'язок між ESG та досягненням стратегічних цілей компанії.

2. Комплексна Система екологічного і соціального управління (СЕСУ) повинна бути наочно ефективною та інтегрованою в систему управління ризиками.

3. Кількісні і якісні показники ефективності повинні охоплювати ступінь задоволення потреб клієнтів та працівників, забезпечення різноманітності людських ресурсів, показники ефективності безпеки, вплив на довкілля,

енергоефективність, галузеві показники. Для полегшення обробки даних впроваджується цифрове маркування інформації.

4. Кваліфікаційні вимоги до співробітників та посадові інструкції повинні містити знання і досвід з питань ESG.

5. Кодекс поведінки, який визначає політику взаємодії зі стейкхолдерами для досягнення спільних інтересів.

6. Механізми подання і розгляду скарг для протидії корупції та хабарництву.

7. Відсутність економічних стосунків з суб'єктами, що є резидентами держав з переліку, затвердженого Радою ЄС 24 лютого 2022 року. Кінцевими бенефіціарними власниками підприємства не можуть бути громадяни країни-агресора.

8. Звітність про результати діяльності у сфері ESG для розкриття суттєвої інформації, яка визначає своєчасний і справедливий доступ до показників ESG.

Згідно з чинним законодавством України, великі та середні підприємства повинні розкривати річний звіт про управління як частину загального річного звіту, хоча вимога щодо надання окремої звітності з соціальних та екологічних питань законодавством поки що не передбачається. На відміну від фінансової інформації, законодавство України не передбачає вимоги щодо аудиту інформації з питань ESG, що розкривається компанією. На сьогодні компанія сама вирішує, чи проводити аудит такої інформації і яким має бути необхідний рівень незалежних підтверджень достовірності інформації з питань ESG, що розкривається нею. На міжнародному рівні спостерігається зростаюча тенденція до надання незалежних підтверджень щодо нефінансової звітності. Традиційно незалежні зовнішні аудити проводяться щодо фінансової звітності, але дедалі частіше їх здійснюють і щодо нефінансової звітності. Вплив компанії на суспільство та навколишнє середовище має бути чітко зрозумілим для стейкхолдерів.

Для структурування ESG діяльності та звітності компанії можуть використовувати цілу низку стандартів та законодавчих документів, як міжнародних, так і національних. Звітування ускладнюється тим, що існують різні показники та вимоги щодо трьох компонентів ESG. Міжнародна рада бізнесу (МРБ/ІВС) Світового економічного форуму (СЕФ/WEF) розробила підхід до вимірювання та розкриття інформації про відповідні аспекти результатів діяльності у сфері ESG на послідовній та порівняльній основі. Звіт МРБ пропонує єдиний основний набір показників та практик розкриття інформації, які можуть використовувати компанії для структуризації своєї звітності. Необхідно пріоритезувати економічні, соціальні та екологічні цілі для управління ситуаціями, коли їх завдання вступають у суперечність.

## Дискусія

Декарбонізація світової економіки та ESG стандарти набувають масштабів глобального тренду, який впливатиме на всі сфери професійної діяльності. Попит на дані, пов'язані з екологічними, соціальними та управлінськими проблемами (ESG), зростає роками і найближчим часом він не зменшиться. Існує багато факторів, які вже сьогодні спонукають державні та приватні компанії надавати пріоритет звітності на основі цінностей ESG. Бізнеси, які впровадять облік парникових газів (GHG Protocol) та встановлять науково



обґрунтовані цілі щодо досягнення кліматичної нейтральності, стануть беззаперечними лідерами у своїх галузях у найближчі 30 років та отримають доступ до інвестиційного капіталу для впровадження заходів щодо боротьби зі змінами клімату. Особливу актуальність ESG набуває для нафтогазової, гірничовидобувної, важкої (зокрема виробництво сталі і цементу) та хімічної промисловості, а також для енергетичної галузі та великих підприємств з виробництва та переробки сільськогосподарської продукції. 1 січня 2021 р. прийнято Закон України «Про засади моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів», який поширюється на підприємства, що спалюють паливо понад 20 МВт; займаються нафтопереробкою, коксохімією, агломерацією залізної руди та окатишів; працюють з чугоном і сталлю, феросплавами, цементним клінкером, вапном і кальцинацією доломіта і магнезису, азотною кислотою, аміаком тощо.

У сфері будівництва фактори ESG мають вирішальне значення для визначення загальної вартості та потенціалу об'єкта нерухомості. Водночас для будівельної галузі загалом характерна непрозорість інформації [8]. При цьому інформація рухає ринки капіталу і існують суворі правила щодо розкриття фінансової інформації. Цифрові технології дають змогу отримувати, інтерпретувати та застосовувати дані ESG, що стимулює процес інвестицій, оскільки допомагає інвесторам отримувати більше інформації для прийняття рішень та оцінки ризиків. ESG стратегії включають об'єктивні та вимірювані цілі, які базуються на точних даних, тому показники ESG для інвестицій у нерухомість посідають центральне місце.

Одним з перших інструментів податкового регулювання у міжнародній торгівлі для досягнення кліматичних цілей став Механізм прикордонного вуглецевого коригування (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM). Закон Німеччини про належну перевірку ланцюга постачання встановлює низку вимог до прав людини та захисту навколишнього середовища для компаній, які постачають товари чи послуги в країні [11]. При цьому законодавчі вимоги поширюються на компанії в різних секторах, незалежно від доходу чи розташування штаб-квартири. Закон вимагає від прямих або (в деяких випадках) непрямих постачальників створити систему управління ризиками, призначити спеціаліста з прав людини, встановити процедуру розгляду скарг, ухвалити політичну заяву щодо стратегії прав людини та, надалі, підготувати річний звіт про виконання цієї стратегії. Законодавство вже діє для компаній із понад 3000 співробітниками, а наступного року почне діяти для компаній із понад 1000 працівників, а у разі невиконання застосовуватимуться штрафні санкції.

Сучасні тенденції «інтегрованого інвестування» передбачають використання критеріїв ESG для глибшого розуміння вартості компанії. Це допомагає аналітикам краще зрозуміти майбутні прибутки та потенційні ризики, беручи до уваги чинники, що ніколи не були частиною традиційного фінансового аналізу. Мета інтегрованої звітності – надати інвесторам необхідну інформацію та допомогти підприємству стати більш зрозумілим для стейкхолдерів та інвесторів. Все частіше ключові зацікавлені сторони в ланцюжках створення вартості компаній вимагають показники різноманітності, справедливості та залученості, цільові показники скорочення викидів або інших даних, пов'язаних із ESG. Ключова мета кліматичної пропозиції Комісії з цінних паперів та бірж (SEC) [18] та інших правил,

пов'язаних зі сталим розвитком, полягає в тому, щоб надати інвесторам високоякісні, своєчасні та порівняльні дані ESG, які вони можуть використовувати для прийняття рішень. Прозорість та підзвітність підвищує довіру між зацікавленими сторонами, сприяючи довгостроковій стійкості бізнесу. Показники ESG починають впливати на вартість ведення бізнесу, оскільки компанії, які нехтують ESG звітністю, програють фінансово та репутаційно. Зрештою, компанії, які виходять на ринок із зрілою стратегією ESG і добре контрольованими даними для її підтримки, матимуть конкурентну перевагу.

Однак єдиного стандарту звітності з питань ESG немає і керівництво компаній зазвичай не знає, яку саме інформацію з питань ESG хочуть отримувати інвестори. Вони також не знають, як збирати або представляти інформацію з питань ESG. Звітування ще більше ускладнюється тим, що існують різні показники та способи подання інформації щодо трьох компонентів ESG. Соціально відповідальна поведінка та сталі практики здійснення бізнес-діяльності сприяють збільшенню прибутковості і зниженню ризиків підприємств. Ініціатива SBTi (Science Based Targets initiative) забезпечує перспективне зростання бізнесу, економить гроші, підвищує енергозбереження, забезпечує стійкість до регулювання, підвищує довіру інвесторів, стимулює інновації та конкурентоспроможність, водночас демонструючи конкретні зобов'язання щодо сталого розвитку.

Важливо визнати потенціал повоєнного відновлення, який забезпечує Україні унікальну можливість стати сучасною, інноваційною країною. Зелена відбудова України – це не просто відновлення зруйнованих будівель та інфраструктури, а відбудова з переходом на новий рівень. Плани з відновлення України мають відповідати високим міжнародним стандартам, а потенційні донори ретельно контролюватимуть використання коштів при фінансуванні післявоєнної відбудови. Дотримання критеріїв ESG надає суттєві переваги для отримання фінансування за рахунок міжнародних фондів відновлення. Нефінансова звітність за ESG стандартами невдовзі стане обов'язковою вимогою для ведення бізнесу, в тому числі і в Україні, яка прямує до Європейського Союзу. Українські компанії, які не подбають вчасно про відповідність міжнародним стандартам, ризикують втратити бізнес вже у середньостроковій перспективі. Підвищення обізнаності щодо ESG допоможе компаніям реагувати на зміни інтересів інвесторів, забезпечити стабільність, конкурентоспроможність та розвиток ринків капіталу України.

## **Висновки**

Історична ретроспектива розвитку будівельної галузі свідчить про тенденцію переходу на новий рівень після глобальних потрясінь, що визначає інноваційний напрямок потенціалу відбудови України із залученням кращих світових тенденцій.

Сучасні міжнародні тренди розвиваються у напрямку глобальної декарбонізації світової економіки та широкомасштабного впровадження ESG стандартів, що невдовзі стануть обов'язковими для ведення бізнесу, в тому числі і в Україні.

Будівельна галузь є значним джерелом вуглецевих викидів та, водночас, може стати основним постачальником рішень з декарбонізації. Впровадження

принципів зеленого будівництва забезпечує економію ресурсів та енергії, стимулює інновації та конкурентоспроможність, підвищує довіру інвесторів та все більш свідомих споживачів.

У сфері будівництва фактори ESG мають вирішальне значення для визначення загальної вартості та потенціалу об'єкта нерухомості, що допомагає інвесторам отримувати більше інформації для прийняття рішень та оцінки ризиків.

Бізнеси, які демонструють конкретні зобов'язання щодо сталого розвитку, стануть беззаперечними лідерами у своїх галузях у найближчі 30 років та отримають доступ до інвестиційного капіталу. Натомість, компанії, які не подбають вчасно про відповідність міжнародним стандартам, ризикують втратити бізнес вже у середньостроковій перспективі.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бекер Т., Айхенгрін Б., Городніченко Ю., Гурієв С., Джонсон С., Милованов Т., Рогофф К., Ведер ді Мауро Б. Нарис про відбудову України – 2022. – Centre for Economic Policy Research, London, UK. – 36 с.
2. Додаток з питань корпоративного управління і сталого розвитку до Кодексу корпоративного управління (Додаток з питань ESG). – 2020. – Національна комісія з цінних паперів та фондового ринку України, Українська академія корпоративного управління. – 34 с.
3. Зелене повоєнне відновлення України: візія та моделі. Аналітична записка. – 2022. – ГО “Ресурсно-аналітичний центр “Суспільство і довкілля”. – 32 с.
4. Херекар Я. Звіт: Стандарти розкриття ESG для небанківських фінансових установ з рекомендаціями. – 2022. – Київ. – 94 с.
5. Carbon Disclosure Project (CDP) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cdp.net>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
6. Climate Disclosure Standards Board (CDSB) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cdsb.net>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
7. Draft Ukraine Recovery Plan. Materials of the “Digitalization” working group. – 2022. – The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War. – 120 с.
8. Ellis M. From Green to ESG: How Data-Driven Transparency Changed Real Estate for Good. – 2022. – Measurabl. – 194 p.
9. European Financial Reporting Advisory Group [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.efrag.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
10. European Sustainability Reporting Standards [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.efrag.org/lab6?AspxAutoDetectCookieSupport=1>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
11. Ganster R., Kirkegaard J., Kleine-Brockhoff T., Stokes B. Designing Ukraine’s Recovery in the Spirit of the Marshall Plan: Principles, Architecture, Financing, Accountability. Recommendations for Donor Countries. – 2022. – German Marshall Fund, Washington, USA. – 46 с.
12. Global Reporting Initiative (GRI) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.globalreporting.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
13. Grabosch R. The supply chain due diligence act (Lieferketten sorgfaltspflichtengesetz, LkSG). Labour and social justice. – 2021. – Friedrich-Ebert-Stiftung. – 12 p.
14. International Financial Reporting Standards (IFRS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ifrs.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.

15. Non-Financial Reporting Directive (NFRD) (2014/95/EU) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.greenfinanceplatform.org/policies-and-regulations/non-financial-reporting-directive-nfrd-directive-201495eu-and-proposal>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
16. Sustainability Accounting Standards Board (SASB) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sasb.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
17. Task Force on Climate-Related Financial Disclosures (TCFD) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.fsb-tcfd.org>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
18. The United States Securities and Exchange Commission (SEC) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sec.gov>. – Назва з екрана. – Дата перегляду: 07.09.2023.
19. Whelan T., Atz U., Clark C. ESG and financial performance: Uncovering the Relationship by Aggregating Evidence from 1,000 Plus Studies Published between 2015–2020. – 2021. – CFA Rockefeller Asset Management. – 19 p.

*Стаття надійшла до редакції 19.06.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.09.2023*

## REFERENCES

1. Becker, T., Eichengreen, B., Gorodnichenko, Y., Guriev, S., Johnson, S., Mylovanov, T., Rogoff, K., Weder di Mauro, B. (2022). A Blueprint for the Reconstruction of Ukraine. London: Centre for Economic Policy Research.
2. Appendix on Corporate Governance and Sustainable Development to the Corporate Governance Code (ESG Appendix) (2020). National Securities and Stock Market Commission of Ukraine: Ukrainian Academy of Corporate Governance [in Ukrainian].
3. Green post-war reconstruction of Ukraine: vision and models. Summary policy brief. (2022). Resource & Analysis Center “Society and Environment”.
4. Herekar J. (2022). Report: ESG disclosure standards for non-bank financial institutions with recommendations. Kyiv: Project Supporting Green Recovery in Ukraine, National Bank of Ukraine, United Nations Development Programme [in Ukrainian].
5. Carbon Disclosure Project, CDP. (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.cdp.net>
6. Climate Disclosure Standards Board, CDSB. (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.cdsb.net>
7. Draft Ukraine Recovery Plan. Materials of the “Digitalization” working group. (2022). The National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War.
8. Ellis M. (2022). From Green to ESG: How Data-Driven Transparency Changed Real Estate for Good. Measurabl.
9. European Financial Reporting Advisory Group. (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.efrag.org>
10. European Sustainability Reporting Standards. (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.efrag.org/lab6?AspxAutoDetectCookieSupport=1>
11. Ganster, R., Kirkegaard, J., Kleine-Brockhoff, T., Stokes, B. (2022). Designing Ukraine’s Recovery in the Spirit of the Marshall Plan: Principles, Architecture, Financing, Accountability. Recommendations for Donor Countries. Washington: German Marshall Fund.
12. Global Reporting Initiative, GRI. (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.globalreporting.org>
13. Grabosch, R. (2021). The supply chain due diligence act (Lieferketten sorgfaltspflichtengesetz, LkSG). Labour and social justice. Friedrich-Ebert-Stiftung.
14. International Financial Reporting Standards, IFRS). (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.ifrs.org>

15. Non-Financial Reporting Directive, NFRD. (2014). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.greenfinanceplatform.org/policies-and-regulations/non-financial-reporting-directive-nfrd-directive-201495eu-and-proposal>
16. Sustainability Accounting Standards Board, SASB (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.sasb.org>
17. Task Force on Climate-Related Financial Disclosures, TCFD (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.fsb-tcfd.org>
18. The United States Securities and Exchange Commission, SEC. (2023, September 7). Retrieved 07.09.2023 from <https://www.sec.gov>
19. Whelan, T., Atz, U., Clark, C. (2021). ESG and financial performance: Uncovering the Relationship by Aggregating Evidence from 1,000 Plus Studies Published between 2015–2020. CFA Rockefeller Asset Management.

*The article was received 19.06.2023 and was accepted after revision 29.09.2023*

**Кривомаз Тетяна Іванівна**

доктор технічних наук, кандидат біологічних наук, професор кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4161-9702> **e-mail:** ecol@i.ua

**Чалий Іван Григорович**

кандидат економічних наук, голова Комітету з практики бухобліку та звітування Федерації професійних бухгалтерів та аудиторів України, UA NvD Platform

**Адреса робоча:** 61023 Україна, м. Харків, вул. Трінклера, 24

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-5537-2707> **e-mail:** ifrs@ukr.net

**Гамоцький Роман Олегович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5469-8606> **e-mail:** roman.gamotskii@gmail.com

**Льченко Ігор Святославович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-0427-138X> **e-mail:** revolenglab@gmail.com

**Циба Артем Миколайович**

аспірант Київського національного університету будівництва та архітектури

**Адреса робоча:** 03037 Україна, м. Київ, проспект Повітрофлотський, 31

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0006-4532-0982> **e-mail:** absqueee@gmail.com

УДК 556.32:504.4.054

**Daniil Marshall<sup>1</sup>**, graduate student of the Department of Environmental Protection and Labor Protection Technologies

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2984-3979> **e-mail:** daniil.marshall@icloud.com

**Yaroslav Shevchuk<sup>2</sup>**, chief engineer

**e-mail:** yaroslav-shevchuk@ukr.net

<sup>1</sup>Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Institute of Water Problems and Reclamation of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## **ASSESSMENT OF THE DETERMINATION OF GROUNDWATER POLLUTION PARAMETERS FROM DESTROYED AMELIORATIVE STRUCTURES, TAIL STORAGE AND FLOODED LANDFILLS**

***Abstract.** As a result of the damage to the structures of the supporting front and the destruction of the protective screens on the reclamation systems, tailings storage facilities, and landfills due to military operations, processes of flooding and pollution of water resources are taking place on the territory of Ukraine. This issue requires an assessment and forecast of the further development of events at the damaged buildings. An integral component of such an assessment is the methodology of approaches to the filtration calculations of the consumption of polluted water through a closed protective screen using the analysis of migration due to the aquifer. In this work, the issues of the theoretical approach to the determination of head loss and filtration through a protective screen for the assessment and further forecast of groundwater pollution by filtration flow from tailings, landfills, and reclamation canals due to their flooding due to military actions are considered. Approaches to the determination of pressure loss through a shielded structure in the event of various types of damage and at various stages of water filtration from channels are given. According to the proposed formulas, the loss of water from the main channel of the Ingulets irrigation system and the filtration coefficient of the damaged lining due to the destruction of the dam of the Kakhovskaya Hydro Electric Station were determined. The results of the research will be useful in making management decisions regarding the protection of water bodies from pollution and in the restoration of damaged structures.*

***Key words:** influence of military operations; pollution of water resources; aquifer; screens of reclamation facilities; filtration losses.*

**Д.І. Маршалл<sup>1</sup>, Я.В. Шевчук<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Київський національний університет будівництва та архітектури, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Інститут водних проблем і меліорації НААН України, м. Київ, Україна

## **ОЦІНКА ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ІЗ ЗРУЙНОВАНИХ МЕЛІОРАТИВНИХ СПОРУД, ХВОСТОСХОВИЩ ТА ЗАТОПЛЕНИХ СМІТТЄЗВАЛИЩ**

***Анотація.** Внаслідок пошкоджень споруд підпорного фронту та руйнувань захисних екранів на меліоративних системах, хвостосховищах, сміттєзвалищах через воєнні дії на території України відбуваються процеси підтоплення та забруднення водних ресурсів. Дане питання потребує оцінки*

*та прогнозу подальшого розвитку подій на пошкоджених спорудах. Невід'ємною складовою такої оцінки є методологія підходів до фільтраційних розрахунків витрат забрудненої води через пошкоджений захисний екран з метою аналізу міграції забруднень водоносним горизонтом. В даній роботі розглянуті питання теоретичного підходу щодо визначення втрат напору та фільтрації через захисний екран для оцінки і подальшого прогнозу забруднення підземних вод фільтраційним потоком з хвостосховищ, сміттєзвалищ, меліоративних каналів внаслідок їх затоплення через воєнні дії. Наведені підходи до визначення втрат напору через екрановану споруду при різного роду пошкодженнях і на різних стадіях фільтрації води з каналів. Визначено втрати води з магістрального каналу Інгулецької зрошувальної системи і коефіцієнт фільтрації пошкодженого облицювання за запропонованими формулами внаслідок руйнування дамби Каховської ГЕС. Результати досліджень стануть в нагоді при прийнятті управлінських рішень щодо захисту водних об'єктів від забруднення та при відновленні пошкоджених споруд.*

**Ключові слова:** вплив воєнних дій; забруднення водних ресурсів; водоносний горизонт; екрани меліоративних споруд; фільтраційні втрати.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.21-31>

## Вступ

Внаслідок надзвичайних ситуацій та воєнних дій на спорудах напорного фронту, в зону підтоплення та затоплення потрапляють хвостосховища, склади з сільськогосподарськими добривами і сміттєзвалища, в тому числі і несанкціоновані. Так, 26 лютого 2022 року в районі с. Козаровичі було зруйновано внаслідок воєнних дій греблю, що відділяла річку Ірпінь від Київського водосховища, перепад висот між якими становив 6-8 м. В результаті цього відбулося затоплення заплави Ірпеня з негативними наслідками цього витоку, а саме: затоплення ділянок сільськогосподарських земель, що оброблялись з осені органічними добривами, деяких угідь в селх Козаровичі та Демидів, сміттєзвалища, а також підтоплено будівельні майданчики на заплаві Ірпеня (наприклад, ЖК Хутір Демидово), вигрібні ями [1]. Негативний вплив на екосистеми басейнів річок та погіршення якості питної води спостерігається і в інших регіонах України внаслідок воєнних дій, зокрема в Донецько-Придніпровському регіоні [2, 3]. Руйнування Каховської ГЕС російськими окупантами 6 червня 2023 року спричинило найбільшу рукотворну екологічну катастрофу в Європі протягом останніх десяти років. У Дніпро потрапило понад 150 тонн машинної олії з Каховської ГЕС, а небезпеки, які спричинені водою, призведуть до змиву ґрунтового шару, вмісту вигрібних ям, знищення інфраструктури, руйнування біорізноманіття водних екосистем на прибережних територіях [4]. Також потребує ретельного аналізу стан руйнування меліоративних систем і великих каналів для зрошення з точки зору підпору та засмічення підземних горизонтів.

Оцінка впливу надзвичайної ситуації на кількісний та якісний стан водних ресурсів на певній території для прийняття управлінських рішень щодо захисту та відновлення прийнятного стану водних ресурсів в майбутньому потребує моделювання фільтраційного підпору водоносних горизонтів на постраждалих територіях та міграційних шляхів потрапляння забруднень в підземні води.

## Мета досліджень

Мета даних досліджень – обґрунтування інженерних розрахунків для оцінки і прогнозування забруднення підземних вод фільтратом сміттєзвалищ та хвостосховищ внаслідок їх затоплення через воєнні дії. Результати досліджень стануть в нагоді при прийнятті управлінських рішень щодо захисту водних об'єктів від забруднення.

## Постановка проблеми і результати досліджень

Питаннями оцінки та моделювання процесів розповсюдження підземними водами забруднюючих речовин внаслідок надзвичайних ситуацій на очисних спорудах, накопичувачах різного виду відходів, фільтрації із сміттєзвалищ різного роду в свій час займалися багато вітчизняних та закордонних вчених [5–9 та інш.]. Аналіз існуючих математичних моделей зазвичай складається з двох взаємопов'язаних блоків: гідродинамічного, або фільтраційного, і блоку трансформації забруднень у фільтруючому пористому середовищі при звичайному режимі експлуатації споруд. Фільтраційний блок вимагає при побудові математичної моделі схематизації геологічних умов, зважаючи на фільтраційні характеристики водоносних шарів і режим фільтрації (стаціонарний, нестаціонарний). Що стосується імовірності надзвичайної ситуації внаслідок воєнних дій на території країни, то аналіз досліджень різних авторів показав, що існуючі компонуально-конструктивні рішення захисту підземних вод від забруднення фільтратом з різного роду накопичувачів та сміттєзвалищ потребують удосконалення та підвищення їх ефективності.

При затопленні певної території на початковому періоді відбувається промочування зони аерації та попадання забруднень на поверхню підземного потоку, що будемо вважати першою стадією фільтрації з затоплених хвостосховищ та сміттєзвалищ. Час промочування і витрата води на затопленій поверхні визначається напором затоплення та коефіцієнтом фільтрації закольматованого або пошкодженого екрану. В результаті нестаціонарного режиму фільтрації відбувається підняття поверхні підземних вод до часу змикання цієї поверхні з дном захисної споруди (друга стадія фільтрації). Третя стадія фільтрації характеризується стаціонарним режимом міграції забруднень різного роду насиченим потоком підземних вод і часом попадання забруднень до поверхневих водних об'єктів. Ця стадія залежить від параметрів області фільтрації та структури водоносних шарів.

У випадку наявності захисного екрану очисної споруди при його порушенні найбільш ймовірними є дві форми руйнувань, а саме:

- у вигляді численних щілин і невеликих порушень цілісності, що знижує ефективність роботи захисної споруди, у деяких випадках аж до зведення її до нуля;
- у вигляді окремих отворів і дірок значного діаметра, що утворилися внаслідок потрапляння уламків від снарядів.

Робота експлуатації облицювання захисних споруд за різними методиками широко розглядалася в задачах фільтрації через меліоративні споруди [10–13 та інш.]. Зазвичай при цьому дослідниками розглядалися прямолінійні щілини та круглі отвори, оскільки всі інші види пошкоджень можуть бути зведені до таких форм.



Визначення витрати фільтрації через окремих елемент пошкодженого екрану можна визначити за формулою:

$$dq = k_{обл} \frac{H}{\delta \cdot dB}, \quad (1)$$

де  $k_{обл}$  – усереднений, або умовний, коефіцієнт фільтрації захисного екрану, що має численні пошкодження, м/добу;

$q$  – витрата, яка поступає в зону аерації через пошкоджений екран, м/добу;

$B$  – ширина відстійника або хвостосховища в перерізі;

$H$  – напор над пошкодженим облицюванням, м;

$\delta$  – товщина захисного екрану.

Усереднений, або умовний, коефіцієнт фільтрації  $k_{обл}$  можна визначити за допомогою коефіцієнта ефективності захисного екрану  $\eta$  за формулою:

$$k_{обл} = \eta \cdot k'_{обл}, \quad (2)$$

де  $k'_{обл}$  – значення коефіцієнта фільтрації облицювання до пошкодження, м/с.

Коефіцієнт ефективності захисного екрану з умовними прямолінійними щілинами може бути визначений за методикою, що наведена в роботі [10]:

$$\eta = \frac{2\delta}{l} \cdot \frac{\pi}{\operatorname{arch} \frac{2ch\left(\frac{2\pi\delta}{l}\right)}{1 - \sin\frac{\pi}{2}\left(1 - \frac{2m}{l}\right)}}. \quad (3)$$

В даній формулі – значення  $l$  – приблизна відстань між щілинами, м.

При наявності в екрані круглих отворів діаметром більше ніж 3 мм, коефіцієнт ефективності можна визначити за емпіричною формулою [10]:

$$\eta = \frac{1}{\omega_{[0,0107(d-3)+0,024]}}; \quad (4)$$

де  $d$  – діаметр дірки в екрані, см;  $\omega$  – площа захисного покриття, в центрі якого утворився цей отвір.

Втрату напору при проходженні захисного екрану в залежності від умовного коефіцієнта фільтрації можна також визначати за методикою, яка пропонується в роботі [14].

$$h_{ост}(0, t) = -H + (H + \delta) \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2}{\mu_n^2} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{at}{\delta^2}\right) \right], \quad (5)$$

де  $\mu_n$  – корінь трансцендентного рівняння, що дорівнює  $\mu_n = (2n-1)\pi/2$ ,  $\alpha = \frac{K_{обл}\delta}{n_{обл}}$ ;  $n_{обл}$  – пористість захисного екрану;  $t$  – час промочування екрану.

У випадку затоплення несанкціонованого, або стихійного, сміттєзвалища, фільтраційну витрату можна визначити за формулою (1), де  $k_{обл}$  приймаємо як коефіцієнт фільтрації закольматованого фільтратом зі сміттєзвалища шару ґрунту, товщиною  $\delta$ . Але при цьому, при розрахунку за відомою формулою Ф.І. Пікалова, запропоновано додавати до величини напору  $H$  вакуум під закольматованим шаром ( $h_v$ ), який може бути прийнятий таким, що дорівнює висоті капілярного підняття для закольматованого ґрунту [13]. Коли

підземний горизонт розташований нижче подвійної висоти капілярного підняття води в незакольматованому ґрунті, приймаємо  $h_v = 0$ .

Фільтраційні втрати на першій стадії фільтрації в зоні неповного насичення визначаємо за формулами:

$$Q_\phi = \bar{Q}_\phi \cdot \left(1 + \frac{b}{\sqrt{t}}\right); \quad (6)$$

$$\bar{Q}_\phi = k_b \left(1 + 0,5 \frac{H_k}{B}\right) [B + 2(H - h_{ocm})]; \quad (7)$$

де  $H_k$  – висота капілярної кайми, м;  $k_b$  – коефіцієнт вологопереносу, який характеризує швидкість руху вологи в зоні аерації, м/доб. Коефіцієнт вологопереносу визначається за відомою формулою С.Ф. Авер'янова [17]:

$$k_b = k \left(\frac{\theta_e - \theta_{MM}}{\theta_n - \theta_{MM}}\right)^n; \quad (8)$$

де  $\theta_e$ ,  $\theta_{MM}$ ,  $\theta_n$  – вологоємність порід у природному стані, максимальна молекулярна і повна;  $k$  – коефіцієнт фільтрації при повному водонасиченні;  $n$  – емпіричний коефіцієнт (дорівнює 3,5).

Параметр насичення  $b$  знаходиться за формулою:

$$b \approx 0,6 \sqrt{\frac{\theta_l H_k + 1,4(H - h_{ocm})}{k_b}}. \quad (9)$$

Оцінюючи характер міграції забруднень в підземних водах, необхідно брати до уваги тип ландшафту, вид та час, за який забруднювач досягне рівня підземних вод і почне мігрувати до споживачів водних ресурсів [13, 15]:

$$t_1 = \frac{\mu}{k} (H_0 - H_k); \quad (10)$$

де  $H_0$  – потужність зони аерації під спорудою.

Друга стадія фільтрації формування бугра ґрунтових вод характеризується часом

$$t_2 = \frac{\pi^2}{4} b^2 \left[\frac{H_0}{[H_0]} - 1\right]^2 \text{ діб}; \quad (11)$$

де  $[H_0]$  – величина, яка дорівнює висоті «бугра» ґрунтових вод. Згідно з [16], цю величину розраховуємо за формулою:

$$[H_0] = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{b \bar{Q}_\phi}{\sqrt{k h \mu}}, h_{cp} = \frac{h_{min} + h_{max}}{2}; \quad (12)$$

де  $h_{cp}$  – середня потужність ґрунтового потоку під каналом;  $h_{min}$  – потужність водоносного горизонту до наповнення каналу, м;  $h_{max}$  – максимальна потужність водонасиченої частини, м;  $\mu$  – коефіцієнт ненасиченості водонасичення, часток одиниці.

Сумарні витрати води із споруди (каналу) визначаються за формулою [17]:

$$v_{1-2} = \bar{Q}_\phi \left( 1 + \frac{2b}{\sqrt{t_1+t_2}} \right) (t_1 + t_2). \quad (13)$$

Коли маємо значні пошкодження захисної споруди у вигляді окремих отворів і дірок значного діаметра, то витрату на рівень підземних вод можна знаходити за відомими формулами для третьої стадії фільтрації, коли відсутня зона аерації. Розрахунок ведеться з використанням методу фільтраційних опорів з врахуванням будови водоносних шарів і їх гідрологічних параметрів [10]:

$$q = \frac{T(H+\delta+H_0)}{\Phi_k + \Phi_{\text{обл}} + \sqrt{\frac{Tz_0}{\varepsilon_0}}}; \quad (14)$$

де  $\Phi_k$  і  $\Phi_{\text{обл}}$ . – фільтраційні опори, які враховують гідродинамічну недосконалість споруди і фільтраційний опір екрану пошкодженої споруди. Значення  $\Phi_c$  знаходимо за методикою, яка детально викладена в роботах [13, 15] в залежності від геологічної будови водоносної товщі;

$T$  – середня водопровідність водоносної товщі, м<sup>2</sup>/с;

$z_0$  – критична глибина залягання рівня ґрунтових вод при  $\varepsilon_0 = 0$ , м;

$\varepsilon_0$  – інтенсивність випаровування на поверхні ґрунту.

Фільтраційний опір пошкодженого екрану можна визначити теоретично як відношення втрат напору при проходженні фільтраційного потоку через облицювання до витрати цього потоку:

$$\Phi_{\text{обл}} = \left[ \frac{h_k}{h_k + \left( h_k + \delta \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n^2} \cos'' \mu_n \frac{x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 \frac{at_n}{\delta}) \right)} - 1 \right] \times \frac{TH+H_0+\delta}{\bar{q}}; \quad (15)$$

де  $\bar{q}$  – односторонній відтік від каналу, але без облицювання.

В роботі [10] представлено фільтраційні опори різних конструкцій облицювань і кріплень каналів зрошувальних систем.

### Результати обговорення

Значна частина забруднень потрапила у відкриту Інгулецьку зрошувальну систему. Після опускання рівня води внаслідок затоплення водою Каховського водосховища фільтраційна вода містить мастила, добрива від змиву з сільськогосподарських полів, органічні забруднення тощо. Процес фільтрації почався, як тільки рівень ґрунтових вод, що опускається, досяг дна споруди. Схематизація гідрогеологічних умов в аналізованому регіоні розглядалася в роботах [18, 19]. За перший шар приймався водоносний горизонт з вільною поверхнею, що залягає в товщі лесовидних суглинків середньої потужності, який підстиляється слабопроникним водотривким шаром червоно-бурих глин. Умовний коефіцієнт фільтрації бетонного облицювання  $K_{\text{обл}}$  згідно з результатами розрахунків не перевищує 10<sup>-2</sup> м/с, а коефіцієнт ефективності захисного облицювання не перевищує значення 0,05. Результати досліджень зведені в таблицю 1.

Таблиця 1. Фільтраційні витрати забрудненої води з Інгулецького магістрального каналу

Найменування пікету Інгулецького магістрального каналу	Тип облицювання	Фільтраційні втрати з 1 м <sup>2</sup> з врахуванням втрати ефективності екрану, м <sup>2</sup> /добу, станом на 2018 р. [20]	Фільтраційні втрати з 1 м <sup>2</sup> відповідно до додатку Р ДБН В.2.4-1-99 [21] для каналу без облицювання, м <sup>2</sup> /добу	Фільтраційні втрати з 1 м <sup>2</sup> відповідно до формули (14), м <sup>2</sup> /добу
К 1+40	п.с.з/б плита/ л.с бетон	0,087	0,117	0,091
ПК 15	п.с.з/б плита/ л.с бетон	0,081	0,108	0,102
ПК 44	з/б плита	0,099	0,133	0,126
ПК 64	з/б плита	0,105	0,140	0,126
ПК 77	з/б плита	0,096	0,129	0,119
ПК 107	бетон	0,072	0,097	0,092
ПК 156	з/б плита. без облиц. дна	0,097	0,130	0,121
ПК 156	з/б плита	0,078	0,104	0,099
ПК 198	з/б плита. без облиц. дна	0,75	0,103	0,098
ПК 198	з/б плита. без облиц. дна	0,78	0,104	0,099
ПК 198	з/б плита. без облиц. дна	0,078	0,104	0,099
ПК 226	з/б плита	0,078	0,104	0,099
ПК 258	з/б плита. без облиц. дна	0,084	0,113	0,098
ПК 286	з/б плита. без облиц. дна	0,78	0,104	0,099
ПК 296	з/б плита	0,099	0,132	0,125
ПК 335	з/б плита	0,79	0,105	0,100
ПК 359	з/б плита	0,79	0,105	0,100
ПК 367	з/б плита	0,101	0,135	
ПК 400	з/б плита. без облиц. дна	0,78	0,104	0,099
ПК 429	з/б плита. без облиц. дна	0,795	0,106	0,101
ПК 453	з/б плита	0,087	0,116	0,110

Результати розрахунків за наведеними формулами свідчать про те, що облицювання практично втратило свою захисну дію внаслідок тривалої експлуатації і при руйнуванні внаслідок воєнних дій. Тому в інженерних розрахунках для оцінки потрапляння забруднення в підземні горизонти та при подальшому відновленні магістрального каналу можна не брати до уваги захисну здатність облицювання.

## Висновки

На основі узагальнення сучасних методів та досвіду розрахунків фільтраційних втрат з захисних пошкоджених споруд було проаналізовано теоретичний підхід до оцінки витрат стічних вод через наявні пошкодження при аварійній ситуації на об'єкті. Проведені розрахунки по окремих ділянках магістрального каналу Інгулецької зрошувальної системи показали, що коефіцієнт фільтрації пошкодженого облицювання внаслідок тривалої експлуатації та проходження воєнних дій на території зрошувальної системи не перевищує  $10^{-2}$  м/с, а коефіцієнт ефективності захисного облицювання не перевищує значення 0,05.

Подальші дослідження щодо оцінки ступеня забруднення водних ресурсів через підземне живлення та прогнозування параметрів забруднення необхідно розглядати через формування гідрохімічних процесів.

Даний підхід дозволяє розробити рекомендації щодо ефективного інженерного захисту підземних вод від забруднення фільтраційним потоком підземного водоносного горизонту внаслідок надзвичайних ситуацій та воєнних дій на території держави.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вольвач Я., Медведєв О. – Підрив дамби, який врятував Київ – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 23.05.2023. – Режим доступу: <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/shcho-vidbuvayetsya-v-seli-demidiv-yake-zatopili-shchob-vryatuvati-kijiv-novini-ukrajini-50238773.html>
2. Ніколаєва І., Ленько Г., Лободзінський О. (2019). Дослідження поточного стану хвостосховищ Донбасу щодо їхнього можливого аварійного впливу на водні об'єкти в умовах військових дій. ОВСЄ, Міністерство енергетики та захисту довкілля. 52 с.
3. Стан басейну Сіверського Дінця та фактори впливу в умовах військових дій. Технічний звіт / ОВСЄ, Міністерство екології та природних ресурсів України, 2018. 88. [Електронний ресурс]. – Дата звернення 23.05.2023. – Режим доступу: <https://www.osce.org/files/f/documents/8/a/419462.pdf>
4. О. Вечканова. Офіційно: росіяни підірвали Каховську ГЕС. Що відбувається, всі подробиці. (2023). – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 30.05.2023. – Режим доступу: <https://telegraf.com.ua/mestnyiy/2023-06-06/5794325-ofitsiyno-rosiyani-pidirvali-kakhovsku-ges-ok-pivden>
5. Олійник О.Я., Калугін Ю.І. (2005). Деякі результати теоретичних досліджень процесів масообміну в пористих середовищах. "Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки", Київ, 5, 100–112.
6. Волошкіна, О.С., Кремез, В.С., Олійник, О.Є. (2012). Теоретичне обґрунтування фільтрації ґрунтових вод і міграції забруднень і добрив у районах зрошення земель. Екологічна безпека і природокористування, 10, 5–24.
7. Щербак О.В., Яковлев Є.О., Долін В.В. (2018). Моделювання гідрогеофільтраційного поля ґрунтових вод у зоні впливу металургійного виробництва. "Мінеральні ресурси України", 3, 19–25.
8. Телима С.В. (2002). Про деякі аспекти дослідження геофільтрації в багатошарових водоносних системах методом математичного моделювання. "Містобудування та терит. планування", 11, 138–146.
9. Telyma, S.V., Voloshkina, O.S., Bereznyska, Y.U.O., Efimenko, V.M. (2020). Modeling of the riverside groundwater intakes exploitation taking into account of the stream flow changes // *Geoinformatics 2020 – XIXth International Conference // "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects"*, 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo084>

10. Проектування протифільтраційних облицювань і кріплень каналів зрошувальних систем. Посібник до ДБН "Меліоративні системи та споруди", Інститут гідротехніки і меліорації ААНУ, (2006) 2.4-1-99, 79 с.
11. Manzoor Ahmad, Jamil Ahmad Tariq, Abid Rashid, Muhammad Rafiq, Naveed Iqbal. (2004). Study of seepage losses from irrigation canals using radioactive tracer technique. – [Electronic resource]. – Retrieved 01.06.2023 from [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/38/039/38039641.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/039/38039641.pdf)
12. Xudong H., Xiugui W., Zhu Y., Jiesheng H., Liqing Y. (2019). An Experimental Study on Concrete and Geomembrane Lining Effects on Canal Seepage in Arid Agricultural Areas. "Zhifu Chang and Feng Fu" // 12(9), 2343; <https://doi.org/10.3390/w12092343>
13. Олейник А.Я. Геогидродинамика дренажа. Киев, Наукова думка, 1984. 284 с.
14. Березницька, Ю.О., Волошкіна, О.С. (2011). Моделювання підтоплення із споруд з екранами для оцінки ефективності природоохоронних заходів. Екологічна безпека і природокористування, 7, 168–175.
15. Телима С.В., Олійник Є.О., Курганська С.М., Харламова О.В. (2015). Моделювання і розрахунки внутрішньодренної гідравліки при роботі підземних водозаборів і дренажів, "Екологічна безпека та природокористування". Київ: ІТІГП, 19, 33–43.
16. Корвер А., Лоренц Е., Ф'юстер Е., Галбрейт Д., Генш Р., Матта Дж., Петер М. (2022). Посібник з технологій водопостачання в умовах надзвичайних ситуацій, UASANS, 1, 228.
17. Подвігіна О.О., Загриценко А.М. (2019). Розрахунок втрат води з каналу і визначення прогнозного положення рівня ґрунтових вод в умовах зрошення. Методичні рекомендації для виконання лабораторних робіт з дисципліни "Меліоративна гідрогеологія" для студентів напряму підготовки 6.040103, Геологія / Донецьк: ДВНЗ Національний гірничий університет, 18. – [Електронний ресурс]. – Дата звернення 12.06.2023. – Режим доступу: [https://gig.nmu.org.ua/en/stud/metod\\_MLG.pdf](https://gig.nmu.org.ua/en/stud/metod_MLG.pdf)
18. Телима С.В. (2015). Прогнозування водно-солевого режиму ґрунтових вод на землях зрошення на основі даних натурних спостережень. Наук-техн. збірник "Містобудування та територіальне планування". Київ, КНУБА, 57, 443–449.
19. Telyma S., Voloshkina O., Anpilova Y., Efimenko V., Yakovliev Y. (2020). Forecasting emergency situations connected with regional flooding by groundwater in southern Ukraine / 16th International May Conference on Strategic Management 170. – [Electronic resource]. – Retrieved 15.06.2023 from <http://mksm.sjm06.com>
20. Ворошнов С. М., Шевчук Я. В., Юзюк О. Ю. (2018). Сучасний технічний стан каналів Інгулецької зрошувальної системи та нові конструкції облицювань із використанням геосинтетичних матеріалів. "Механізація та електрифікація сільського господарства", 8, 232–240.
21. ДБН В.2.4-1-99 "Меліоративні системи та споруди", Затверджено Наказом Держбуду України від 25.06.1999, 15.

*Стаття надійшла до редакції 20.07.2023 і прийнята до друку після рецензування 22.10.2023*

## REFERENCE

1. Volvach Ya, Medvedev O. Blowing up the dam that saved Kyiv. Retrieved 23.05.2023 from <https://nv.ua/ukr/ukraine/events/shcho-vidbuvayetsya-v-seli-demidiv-yake-zatopili-shchob-vryatuvati-kijiv-novini-ukrajini-50238773.html> [in Ukrainian].
2. Nikolayeva, I., Lenko, G., Lobodzinskyi, O. (2019). Study of the current state of Donbas tailings repositories regarding their possible emergency impact on water bodies in the context of military operations. OSCE, Ministry of Energy and Environmental Protection [in Ukrainian].

3. The state of the Siversky Donets basin and influencing factors in the conditions of military operations. (2018). Technical report, Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine [in Ukrainian].
4. Vechkanova, O. (2023). It's official: the Russians blew up the Kakhovskaya HPP. What's On, Full Details. Retrieved 30.05.2023 from <https://telegraf.com.ua/mestnyiy/2023-06-06/5794325-ofitsiyno-rosiyani-pidirvali-kakhovsku-ges-ok-pivden> [in Ukrainian].
5. Oliynyk, O.Ya., Kalugin, Yu.I. (2005). Some results of theoretical studies of mass transfer processes in porous media. *Problems of water supply, drainage and hydraulics*, 5, 100-112 [in Ukrainian].
6. Voloshkina, O.S., Kremez, V.S., Oliynyk, O.E. (2012). Theoretical justification of groundwater filtration and migration of pollutants and fertilizers in the areas of irrigated lands. *Environmental safety and natural resources*, 10, 5–24 [in Ukrainian].
7. Shcherbak, O.V., Yakovlev, E.O., Dolin, V.V. (2018). Modeling of the groundwater hydrogeofiltration field in the zone of influence of metallurgical production. *Mineral Resources of Ukraine*, 3, 19-25 [in Ukrainian].
8. Telima, S.V. (2002). On some aspects of the study of geofiltration in multilayer aquifer systems by the method of mathematical modeling. *Urban Planning and Territorial Planning*, 11, 138-146 [in Ukrainian].
9. Telyma, S.V., Voloshkina, O.S., Berezhnytska, Yu.O., Efimenko, V.M. (2020). Modeling of the riverside groundwater intakes exploitation taking into account of the stream flow changes. In *XIXth International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects»*, (pp. 1–5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo084>
10. Design of anti-filtration facings and fastenings of channels of irrigation systems. Guide to the DBN "Reclamation systems and structures". Institute of hydraulic engineering and reclamation of the National Academy of Sciences. (2006) 2.4-1-99, 79 [in Ukrainian].
11. Manzoor Ahmad, Jamil Ahmad Tariq, Abid Rashid, Muhammad Rafiq, Naveed Iqbal. (2004). Study of seepage losses from irrigation canals using radioactive tracer technique. Retrieved 01.06.2023 from [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/38/039/38039641.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/38/039/38039641.pdf)
12. Xudong, H., Xiugui, W., Zhu, Y., Jiesheng, H., Liqing Y. (2019). An Experimental Study on Concrete and Geomembrane Lining Effects on Canal Seepage in Arid Agricultural Areas. *Zhifu Chang and Feng Fu*, 12(9), 2343. <https://doi.org/10.3390/w12092343>
13. Oleynyk, A.Ya. (1984). Geohydrodynamics of drainage. Kyiv: Naukova dumka [in Russian].
14. Berezhnytska, Yu.O., Voloshkina, O.S. (2011). Modeling of inundation from structures with screens to assess the effectiveness of environmental protection measures. *Environmental safety and natural resources*, 7, 168-175 [in Ukrainian].
15. Telima, S.V., Oliynyk, E.O., Kurganska, S.M., Kharlamova, O.V. (2015). Modeling and calculations of intradrain hydraulics during operation of underground water intakes and drainages. *Environmental safety and natural resources*, 19, 33-43 [in Ukrainian].
16. Korver, A., Lorenz, E., Fyster, E., Galbraith, D., Gensch, R., Matta, J., Peter, M. (2022). Handbook on water supply technologies in emergency situations, UASANS, 1, 228 [in Ukrainian].
17. Podvihina, O.O., Zagrytsenko, A.M. (2019). Calculation of water losses from the canal and determination of the forecast position of the groundwater level under irrigation conditions. Methodological recommendations for performing laboratory work in the discipline "Remedial hydrogeology" for students of the training direction 6.040103, Geology. Donetsk, National Mining University. Retrieved 12.06.2023 from [https://gig.nmu.org.ua/en/stud/metod\\_MLG.pdf](https://gig.nmu.org.ua/en/stud/metod_MLG.pdf) [in Ukrainian].
18. Telima, S.V. (2015). Forecasting the water-salt regime of groundwater on irrigated lands based on data from field observations. Scientific and technical collection. *Urban planning and territorial planning*, 57, 443-449 [in Ukrainian].

19. Telyma, S., Voloshkina, O., Anpilova, Y., Efimenko, V., Yakovliev, Y. (2020). Forecasting emergency situations connected with regional flooding by groundwater in southern Ukraine. In *16th International May Conference on Strategic Management*. Retrieved 15.06.2023 from <http://mksm.sjm06.com>
20. Voroshnov, S.M., Shevchuk, Y.V., Yuzyuk, O.Yu. (2018). Current technical condition of the channels of the Ingulets irrigation system and new lining designs using geosynthetic materials. *Mechanization and Electrification of Agriculture*, 8, 232-240 [in Ukrainian].
21. DBN V.2.4-1-99 "Melioration systems and structures". Approved by Order of the State Building of Ukraine dated 06.25.1999 No. 15 [in Ukrainian].

*The article was received 20.07.2023 and was accepted after revision 22.10.2023*

**Маршалл Данііл Ігорович**

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

**Адреса робоча:** Повітрофлотський проспект, 31, м. Київ, 03037, Україна

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2984-3979> **e-mail:** daniil.marshall@icloud.com

**Шевчук Ярослав Власович**

головний інженер Інституту водних проблем і меліорації НААН України

**Адреса робоча:** 03022, Україна, м. Київ, вул. Васильківська, 37

**e-mail:** yaroslav-shevchuk@ukr.net



UDC 502.174:627.533

**Mykhailo Petlovanyi**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8911-4973> **e-mail:** petlovanyi.m.v@nmu.one

**Kateryna Sai**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1488-3230> **e-mail:** sai.k.s@nmu.one

**Vasyl Popovych**<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2857-0147> **e-mail:** popovich2007@ukr.net

**Maksym Chebanov**<sup>1</sup>, Doctor of Philosophy  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-2701> **e-mail:** chebanov.m.o@nmu.one

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Lviv State University of Life Safety, Lviv, Ukraine

## **METHODOLOGICAL APPROACH TO DETERMINING PROMISING “QUARRY CAVITIES – BACKFILL MATERIAL” SYSTEMS ON THE TERRITORY OF UKRAINE**

***Abstract.** The research is aimed at identifying promising “quarry cavities – backfill material” systems on the territory of Ukraine. Currently, the existing reclamation methods for quarry cavities do not provide for the earth’s surface level complete restoration. A number of industrial wastes, the accumulation of which is increasing rapidly, are potential backfill materials. An insufficiently studied and promising method for restoring the earth’s surface level is the formation of a backfill mass in quarry cavities, which can provide geomechanical stability. Nevertheless, in order to develop directions for backfilling, it is necessary to have information on the spatial distribution of quarry cavities and potential backfill materials on the territory of Ukraine, which is also insufficiently studied today. The paper forms and reveals a theoretical idea about the “quarry cavities – backfill material” systems. A number of important conditions for the harmonious existence and effective implementation of the specified promising systems are characterized. The methodology for creating the basis of an information-analytical map is presented, and the principles for determining and characterizing its main constituent elements are given. A new information-analytical map of the spatial location of potential backfill materials and formed quarry cavities on the territory of Ukraine has been created, on the basis of which possible “quarry cavities – backfill material” systems have been identified. It has been determined that today on the territory of Ukraine, for the earth’s surface level complete restoration, it is expedient to consider the formation of a backfill mass in quarry cavities in 12 districts, where there are promising “quarry cavities – backfill material” systems. The concept of a complete restoration development of the earth’s surface disturbed by mining operations in certain potential systems is possible under conditions of synergistic interaction between public authorities and private business. The practical result obtained is an important basis for creating an effective mechanism and effective measures for a complete restoration of the earth’s surface state, which will contribute to strengthening the international image of Ukraine as a responsible and environmentally conscious country.*

**Keywords:** reclamation; earth’s surface; quarry; industrial wastes; backfill material; method for backfilling; environment protection.

М.В. Петльований<sup>1</sup>, К.С. Сай<sup>1</sup>, В.В. Попович<sup>2</sup>, М.О. Чебанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, м. Львів, Україна

## МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ «КАР'ЄРНІ ПУСТОТИ – ЗАКЛАДНИЙ МАТЕРІАЛ» НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

***Анотація.** Дослідження спрямоване на виявлення перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» на території України. На сьогодні існуючі методи рекультивациі кар'єрних пустот не передбачають повного відновлення рівня земної поверхні. Низка промислових відходів, накопичення яких стрімко збільшуються, є потенційними закладними матеріалами. Недостатньо вивченим та перспективним способом відновлення рівня земної поверхні є формування закладного масиву у кар'єрних пустотах, що забезпечить геомеханічну надійність. Проте, для розвитку напрямів закладання потрібно володіти інформацією просторового розміщення кар'єрних пустот і потенційних закладних матеріалів на території України, що також на сьогодні вивчено недостатньо. У роботі сформувано та розкрито теоретичне уявлення про системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал». Надана характеристика низки важливих умов гармонійного існування й ефективної реалізації визначених перспективних систем. Викладено методологію створення основи інформаційно-аналітичної карти та наведено принципи визначення і характеристики її основних складових елементів. Створено нову інформаційно-аналітичну карту просторового розташування потенційних закладних матеріалів та утворених кар'єрних пустот на території України, на основі якої визначені можливі системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал». Встановлено, що на сьогодні на території України для повного відновлення земної поверхні формування закладного масиву у кар'єрних пустотах доцільно розглядати у 12 районах, де розташовано перспективні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал». Концепція розвитку повного відновлення земної поверхні, порушеної гірничими роботами, у визначених потенційних системах можлива за умов синергетичної взаємодії державних органів влади та приватного бізнесу. Основними принципами повинні стати екологічна відповідальність, мінімізація впливу гірничодобувної галузі на довкілля та захист інтересів громадян, особливо у вельми техногенно навантажених районах. Отриманий практичний результат є важливим підґрунтям для створення дієвого механізму та ефективних заходів з повного відновлення стану земної поверхні, що сприятиме зміцненню міжнародного іміджу України як відповідальної та екологічно усвідомленої країни.*

***Ключові слова:** рекультивациія; земна поверхня; кар'єр; промислові відходи; закладний матеріал; спосіб закладання; захист довкілля.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.32-47>

### Вступ

Гірничодобувна галузь є важливим сектором економічного розвитку багатьох розвинених країн та країн, що розвиваються, у тому числі й України [1-3]. Так, у довоєнний стан за 2019 рік діяльність підприємств гірничо-металургійного комплексу забезпечила 15,2 млрд доларів валютних надходжень до державного бюджету України, що складає 38% та 10,5% від загального

ВВП [4]. В надрах України виявлено понад 20 тис. родовищ і проявів зі 117 видами мінеральної сировини, з яких понад 8949 родовищ мають промислове значення і враховуються Державним балансом запасів корисних копалин, при цьому промислово освоєно понад 2800 родовищ із 100 видів корисних копалин [5]. Найбільше за обсягами видобування розробляються родовища залізних руд, кам'яного вугілля, природного газу, нафти, марганцевих і титано-цирконієвих руд та родовищ будівельної сировини (граніти, вапняки, піски, каоліни, глини тощо).

На сьогодні розробка родовищ здійснюється переважно відкритим способом, що завдає найбільшого впливу земній поверхні та довкіллю. Кількість порушених земель за даними Держгеокадастру становить 142,7 тис. га, серед яких лідерами є такі області: Дніпропетровська (37,7 тис. га), Донецька (25,3 тис. га), Львівська (10,7 тис. га) та Луганська (10,3 тис. га). Очевидно, що найбільший вплив чинить саме гірничодобувна галузь, яка широко розвинена в цих областях. Рівень рекультивації є досить низьким і склав за 2020 рік лише 51,2 га [6]. Проте, за оцінками деяких вчених, площа земель, порушених лише відкритими гірничими розробками в Україні, становить понад 165 тис. га, в тому числі відпрацьованих, – на рівні 60 тис. га [7]. Зазначені дані свідчать про потужний негативний вплив гірничодобувної галузі на стан земної поверхні. Основними формами порушень земної поверхні при відкритому способі розробки є утворення значних пустот у надрах та складування багатотоннажних накопичень промислових відходів на земній поверхні.

Зазначені види порушень земної поверхні призводять до втрат використання земельного потенціалу, постійного збільшення накопичень промислових відходів (відвали порід, хвостосховища, металургійні шлаки тощо) та відведення нових площ при досягненні їх проектних розмірів, забруднення компонентів довкілля та соціальної обуреності населення [8-11]. Відновлення рівня земної поверхні особливо важливе у промислово розвинених регіонах, де будівельна рекультивація порушених земель є перспективним напрямом, але обмежена відсутністю науково-обґрунтованих способів відновлення земної поверхні із забезпеченням її геомеханічної стабільності та надійності.

При підземній розробці родовищ для вилучення цінних видів корисних копалин, попередження просідання земної поверхні й утилізації промислових відходів, особливо в регіонах з розвинутою промисловою та цивільною інфраструктурою, застосовуються технології закладання виробленого простору [12-14]. При відкритих гірничих роботах для відновлення порушених територій використовують різні напрями рекультивації, яка складається з технічного та біологічного етапів [15, 16]. Для повного відновлення земної поверхні, зайнятої кар'єрними розробками, на сьогодні існує звичайне засипання вироблених просторів кар'єрів розкривними та скельними породами [17, 18], яке можливо здійснити за умов наявності достатніх обсягів таких порід при експлуатації кар'єра або наявності інших відвалів у безпосередній близькості. Проте, суттєвим недоліком зазначеного методу є пустотність, нерівномірність розподілу фракцій та високий коефіцієнт фільтрації відсипаного масиву [19].

Перспективним способом відновлення рівня земної поверхні може стати розвиток напрямів формування закладного масиву у кар'єрних пустотах, що

забезпечить стійкість і геомеханічну надійність земної поверхні на тривалий період. На відміну від звичайного засипання кар'єрних пустот, потрібен комплексний підхід, в якому можуть бути розглянуті різні способи закладання виробленого простору або їх комбінація для більш ефективного відновлення стану земної поверхні. При цьому наявність достатніх запасів закладного матеріалу поблизу кар'єрних пустот має вагоме значення. Формування надійного закладного масиву може бути ефективним з точки зору екології, оптимального використання відновленої земної поверхні та економічних переваг, сприяючи розвитку інфраструктури й залученню інвестицій у промисловий регіон. При обґрунтуванні доцільності формування закладного масиву важливо врахувати аспекти збереження довкілля, довгострокової стабільності земної поверхні, економічної ефективності та соціальних аспектів.

Таким чином, виникає нове поняття «кар'єрні пустоти – закладний матеріал», яке по суті є відправною точкою у розвитку технологій формування закладного масиву при відкритих гірничих роботах. Проте, для цього необхідно володіти інформацією щодо просторового розміщення діючих і закритих кар'єрів та потенційних закладних матеріалів на території України. Аналітична оцінка розташування накопичень промислових відходів, що можуть розглядатись як потенційні закладні матеріали, та кар'єрів на території України на сьогодні не проведена, і цим актуальним питанням приділено недостатньо уваги науковою спільнотою та органами державної влади.

## **Матеріали і методи досліджень**

Метою дослідження є виявлення перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» та їх параметрів на території України, що утворились при функціонуванні різних галузей промисловості, на основі вивчення і систематизації аналітичних даних розміщення промислових відходів як потенційних закладних матеріалів, а також діючих і закритих кар'єрів для подальшого обґрунтування ефективних способів закладання й відновлення земної поверхні. Для встановлення перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» на території України використано комплексний науково-методичний інструментарій, який передбачає визначення географічного розташування та характеристик промислових відходів як потенційних закладних матеріалів, а також утворених кар'єрних пустот з наступним їх об'єднанням в єдину інформаційно-аналітичну базу та виділенням відповідних систем.

Дослідження проводились у декілька етапів: аналіз місць розташування та характеристик визначених промислових відходів як потенційних закладних матеріалів; аналіз місць розташування та характеристик утворених кар'єрних пустот; об'єднання аналітичних даних розташування промислових відходів і кар'єрних пустот у єдину інформаційно-аналітичну карту. Інструменти та методи досліджень: вивчення реєстрів місць видалення відходів, екологічних паспортів та регіональних доповідей про стан навколишнього середовища, інформаційних даних Державної служби геології та надр України, супутникова програма Google Earth і низка літературно-інформаційних ресурсів.

При виконанні досліджень також використовувались теоретичні методи, такі як збір та аналіз аналітичних даних, узагальнення й систематизація.

Основним практичним результатом досліджень є створення нової інформаційно-аналітичної карти розміщення промислових відходів і кар'єрних пустот на території України з наступним виділенням перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал».

## Результати досліджень та обговорення

Система «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» є новою методологією або підходом, який полягає у використанні відпрацьованих кар'єрів шляхом заповнення їх простору спеціально підібраним закладним матеріалом. Цей підхід дозволяє ефективно відновити та переобладнати вироблені кар'єри, перетворюючи їх на стійкі й безпечні території для подальшого використання. Система «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» є важливим аспектом у сучасному гірничодобувному промисловому комплексі, оскільки сприяє оптимізації використання земельних ресурсів, зниженню негативного впливу на навколишнє середовище та сталому розвитку територій. Вивчення місць розташування й об'ємів потенційних закладних матеріалів та утворених кар'єрних пустот на території України є важливим для визначення потенціалу до закладання вироблених просторів певних кар'єрів з метою створення стійкого закладного масиву, ефективного відновлення рівня земної поверхні та подальшого використання відновленої території.

Існує низка важливих умов існування й ефективної реалізації визначених перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал», які відіграють ключову роль в успішному та стійкому здійсненні технології відновлення земної поверхні на основі формування стійких закладних масивів. Перелік зазначених основних умов, на думку авторів, ілюструється на рис. 1, при дотриманні яких формування стійкого закладного масиву у кар'єрних пустотах дозволить досягти повного відновлення земної поверхні. Наведемо стисло характеристику основних умов.

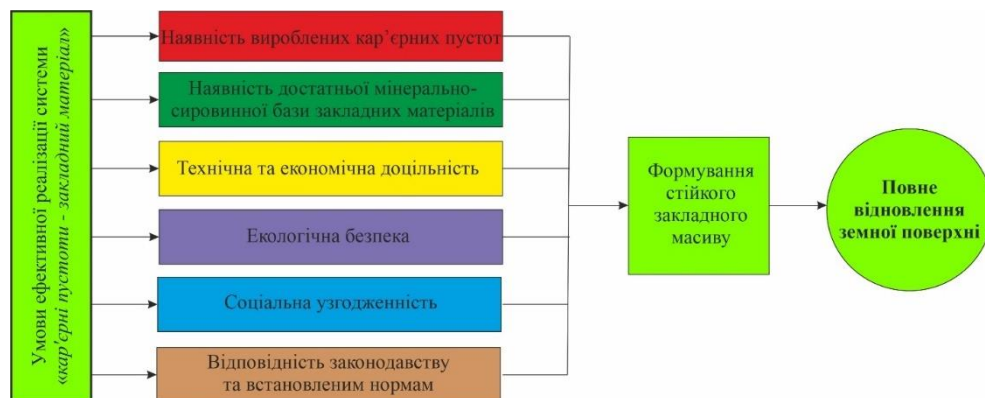


Рис. 1. Основні умови існування й ефективної реалізації системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал»

*Наявність утворених кар'єрних порожнин у надрах.* Для реалізації системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» безпосередньо необхідна наявність вироблених кар'єрів. Ці пустоти можуть виникати в результаті

гірничодобувних робіт, і їхнє оптимальне використання дозволить ефективно реалізувати концепцію закладання.

*Наявність достатньої мінерально-сировинної бази закладних матеріалів.* Для успішної реалізації системи важливо мати різноманітні та доступні джерела визначених закладних матеріалів, таких як відвали гірських порід, металургійні шлаки, золошлаки, хвости збагачення, техногенні вапняки та інші відходи промисловості. Це забезпечить стійке постачання закладних матеріалів і знизить витрати на їх транспортування та переробку.

*Технічна та економічна доцільність.* Реалізація системи має бути технічно та економічно обґрунтованою. Це включає визначення оптимальних методів заповнення кар'єрних пустот, вибір найбільш ефективних матеріалів, оцінку витрат і прогнозованих результатів. Технічна доцільність гарантує успішне виконання закладних робіт, а економічна – обґрунтовані інвестиції.

*Екологічна безпека.* Система має бути екологічно безпечною та враховувати вплив на навколишнє середовище. Заповнення пустот закладним матеріалом не повинно викликати негативні наслідки для підземних вод, що концентруються у днищах кар'єрів. Необхідним є дослідження можливого впливу визначених закладних матеріалів та, у випадку негативного впливу, – розробки заходів ізоляції і герметизації гірського масиву. Значним позитивним аспектом формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єрів є вивільнення земельних площ, зайнятих як кар'єрною розробкою, так і накопиченнями промислових відходів.

*Соціальна узгодженість.* Реалізація системи має враховувати інтереси всіх зацікавлених сторін, включаючи місцеве населення, громадськість та державні органи. Консультації з громадськістю і прозорий діалог дозволяють досягти соціальної узгодженості та мінімізувати конфлікти.

*Відповідність законодавству та встановленим нормам.* Вся діяльність, пов'язана з реалізацією системи, має суворо відповідати чинному законодавству та нормативам України. Це включає дотримання вимог щодо охорони навколишнього середовища, землекористування та інших правових норм.

Дотримання зазначених умов дозволяє оптимізувати процес заповнення, знизити економічні витрати, забезпечити екологічну безпеку та отримати підтримку з боку суспільства й державних органів.

Таким чином, умови гармонійного існування та реалізації системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» у гірничодобувному регіоні потребують балансу між економічними, технічними, екологічними та соціальними аспектами. Необхідно прагнути максимальної ефективності використання ресурсів, мінімізації негативного впливу на довкілля і задоволення потреб суспільства у процесі сталого розвитку промислових регіонів.

Для визначення можливих існуючих систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» на території України, де потенційно доцільно здійснити відновлення земної поверхні на основі формування стійких закладних масивів, було створено нову інформаційно-аналітичну карту взаємного розташування перспективних закладних матеріалів та утворених кар'єрних пустот за допомогою інструменту Google Earth Online. Методологія створення основи інформаційно-аналітичної карти полягала у послідовних етапах, що наведені на рис. 2.

В інформаційно-аналітичній карті створено спеціальне меню, де всі аналізовані об'єкти розділені на відповідні групи: хвостосховища та

шламосховища; відвали розкривних і скельних порід; породні відвали шахт; золошламонакопичувачі; відвали металургійних шлаків; інші промислові відходи; кар'єри; потенційні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал».

Далі наводяться принципи визначення і характеристики основних складових елементів інформаційно-аналітичної карти.



Рис. 2. Послідовність та етапність виявлення систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» на території України

1. *Накопичення промислових відходів* (потенційні закладні матеріали). Попередніми дослідженнями на основі світового досвіду вивчено [20], що в якості основних закладних матеріалів техногенних пустот першочергово слід розглядати відходи природно-техногенного походження – відвальні кар'єрні та шахтні породи, золи-виносу та золошлаки, хвости збагачення, металургійні шлаки, а також інші додаткові матеріали (техногенні вапняки, фосфогіпси, ангідрити тощо). Тому на карту було нанесено місцерозташування багатотоннажних накопичень вищезазначених промислових відходів. Накопичення менше 100 тис. т до уваги не брались. Визначення місць розташування та основних характеристик потенційних закладних матеріалів здійснювалось на основі вивчення реєстрів місць видалення цих відходів за областями України. Слід зазначити, що у реєстрах Донецької та Луганської областей відсутня значна частина інформаційних даних щодо місць видалення відходів на тимчасово окупованих територіях російською федерацією або інформація надто застаріла. Це пов'язано з тим, що відповідним органам неможливо на сьогодні на окупованих територіях достовірно виконати ревізійні заходи об'єктів місць видалення відходів. Було зроблено запити до державних військово-цивільних адміністрацій областей України з метою отримання реєстрів місць видалення відходів областей станом на 2019–2021 роки.

Додатково вивчались дані екологічних паспортів та регіональних доповідей про стан навколишнього середовища областей, супутникової програми Google Earth, а також низка літературних та інформаційних ресурсів.

До кожного об'єкта промислових відходів в інформаційно-аналітичній карті на основі аналізу внесено наступні характеристики: географічні координати (широта, довгота), вид матеріалу, його походження (природний/техногенний), хімічний склад (за наявності), гранулометричний склад, щільність, категорія екологічної безпеки місця видалення відходів (МВВ), клас та група небезпеки відходів, режим функціонування МВВ (діюче/законсервоване/закрите), характеристика МВВ (наземне/насіпне/наливне), площа, що займається (га), об'єм накопичення (млн т/млн м<sup>3</sup>).

2. *Діючі та закриті кар'єри*. Визначення місць розташування та основних характеристик утворених кар'єрних пустот діючими і закритими кар'єрами здійснювалось на основі вивчення інформаційних даних Державного геологічного порталу Державної служби геології та надр України. Додатково вивчались дані супутникової програми Google Earth та низка літературно-інформаційних ресурсів. В дослідженнях увага приділялась типам кар'єрів, які утворили внаслідок видобування значні пустоти як за площею поверхні, так і за глибиною ( $S > 5$  га,  $H > 20$  м). Не враховувались кар'єри, що розробляють родовища таких корисних копалин, як каоліни, глини, суглинки, піски, марганцеві та титанові руди тощо, де застосовуються системи розробки з внутрішнім відвалоутворенням розкривних порід і рекультиваційними заходами одразу за переміщенням фронту гірничих робіт. Після виконання добувних робіт в зазначених типах кар'єрів здійснюється майже повне відновлення земної поверхні без залишення значних пустот в надрах. В даному дослідженні приділялась увага тим кар'єрам, по завершенню терміну роботи яких не вистачить розкривних порід для повного відновлення земної поверхні при виконанні рекультиваційних робіт.

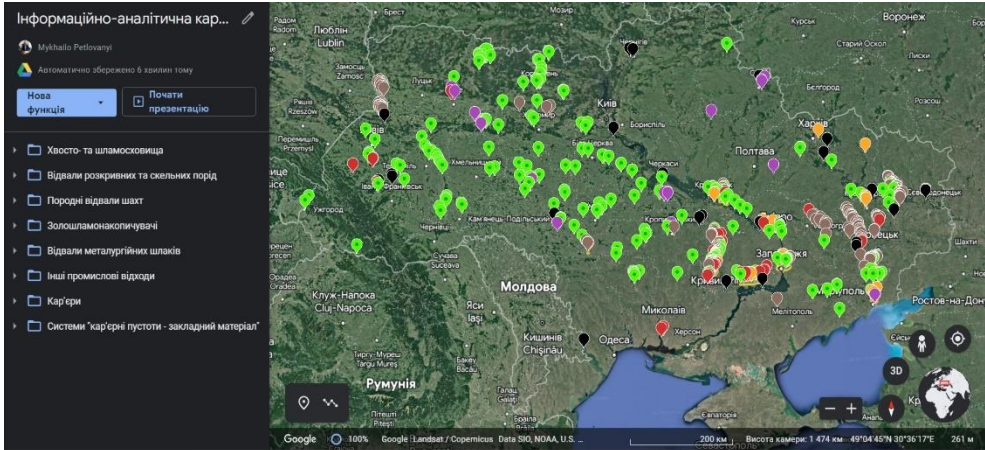
До кожної виявленої кар'єрної пустоти в інформаційно-аналітичній карті на основі аналізу внесено наступні характеристики: географічні координати (широта, довгота), назва родовища, вид корисної копалини, промислові запаси (млн т/млн м<sup>3</sup>), річна продуктивність (тис. м<sup>3</sup>/млн т), зайнята площа кар'єру по поверхні (га), глибина кар'єру (м), прогнозний об'єм пустот (млн м<sup>3</sup>), статус (діючий/закритий), термін дії спецдозволу на користування надрами, прогнозний термін закриття кар'єру.

3. *Потенційні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал»*. На підставі детального аналізу на інформаційно-аналітичну карту України нанесено 50 хвостосховищ та шламосховищ, 90 відвалів розкривних порід, 110 відвалів вугільних і рудних шахт, 34 золошлаконакопичувачі, 25 відвалів металургійних шлаків, 16 об'єктів додаткових закладних матеріалів (некондиційний вапняк, фосфогіпс, ангідриди тощо) та 221 визначений кар'єр.

Виявлення потенційних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» здійснено на основі зіставлення просторового розташування багатотоннажних накопичень закладних матеріалів та утворених кар'єрних пустот на території України. Елементи нової розробленої інформаційно-аналітичної карти наведено на рис. 3. Рис. 3 (а) ілюструє фрагмент карти та меню з категоріями визначених видів промислових відходів, що розглядаються в якості закладних матеріалів. На рис. 3 (б) і 3 (в) зображені впливаючі інформаційні вікна, в яких сформовані основні характеристики об'єктів.



(a)



- Умовні позначення:
- Хвосты- та шламосховища
  - Відвали розкривних та скельних порід; породи відвали шахт
  - Золошламонакопичувачі
  - Інші промислові відходи
  - Відвали металургійних шлаків
  - Кар'єри

(б)



(в)



(г)



Рис. 3. Видяг створеної інформаційно-аналітичної карти та її елементів: (а) фрагмент карти з меню; (б) фрагмент інформаційного вікна «кар'єр»; (в) фрагмент інформаційного вікна «закладний матеріал»; (г) виявлені потенційні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал»

Рис. 3 (г) демонструє просторове розташування потенційних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» на території України, яке співпадає з найбільш промислово розвиненими регіонами. Інформаційно-аналітична карта надає систематизовану та точну інформацію щодо просторового розташування та основних характеристик промислових відходів і кар'єрів на території країни.

Потенційні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» виявлені на підставі проведеного просторового аналізу розташування багатотоннажних накопичень промислових відходів як потенційних закладних матеріалів та утворених значних кар'єрних пустот при відкритій розробці родовищ корисних копалин на території України.

Нами було виявлено низку груп близького розташування зазначених об'єктів. Ці групи визначаються як можливі до реалізації системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал».

Встановлено, що на території України, на думку авторів, доцільно першочергово розглядати можливість повного відновлення земної поверхні шляхом формування закладних масивів у вироблених просторах кар'єрів у 12 районах (системах), яким умовно задані спеціальні назви.

Перелік виявлених систем та характеристика їх наявних умов існування викладена у табл. 1. У зазначених районах існують сприятливі умови для розробки технологій формування закладних масивів, адже існує відповідна мінерально-сировинна база закладних матеріалів і є наявність утворених в надрах кар'єрних пустот.

Невід'ємною складовою є визначення найважливіших показників потенційних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал», що наведено в табл. 1. Планується до кожної виявленої системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» у інформаційно-аналітичній карті внести наступні характеристики: детальний перелік закладних матеріалів у системі, показники займаних площ (га) та об'ємів накопичення закладних матеріалів (млн м<sup>3</sup>/млн т), кількість кар'єрів, статус кар'єрів (діючий/закритий), прогностичні терміни закриття кар'єрів, об'єми вироблених просторів кар'єрів (млн м<sup>3</sup>). Після виконання відповідних досліджень до кожної системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» заплановано додати інформацію щодо перспективних технологій закладання.

У подальших дослідженнях передбачається детально дослідити характеристики визначених потенційних систем «кар'єрні пустоти – закладні матеріали» та визначити напрями ефективних способів закладання з метою розробки відповідної оптимальної технології. Наступними завданнями досліджень повинні стати:

- визначення загальних об'ємів накопичення закладних матеріалів у потенційних системах «кар'єрні пустоти – закладні матеріали»;
- вибір кар'єрних пустот для закладання на основі встановлення прогностичного терміну роботи кар'єрів і аналізу стану закритих кар'єрів в системах «кар'єрні пустоти – закладні матеріали»;
- встановлення позитивного балансу наявних об'ємів закладного матеріалу та об'ємів вироблених просторів кар'єрних пустот для закладання;
- аналіз фізичних, хімічних та механічних властивостей наявних видів закладних матеріалів;

- вибір ефективних методів закладання кар'єрних пустот на основі врахування специфіки наявних видів закладних матеріалів, комплексу особливостей утворених пустот, переваг і недоліків технологій закладання;
- визначення першочергових регіонів для повного відновлення земної поверхні, порушеної гірничими роботами з урахуванням економічних, екологічних і соціальних аспектів, а також відповідних норм та стандартів.

Табл. 1. Характеристика виявлених систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал»

№ з/п	Назва системи	Наявність умов існування системи	
		Мінерально-сировинна база закладних матеріалів	Утворені кар'єрні пустоти
1	Криворізька №1	12 відвалів розкривних і скельних порід; 5 хвостовищ відходів збагачення залізних руд; 3 відвали металургійних шлаків (у т.ч. некондиційне вапно)	3 діючих кар'єри; 2 закритих кар'єри
2	Криворізька №2	12 відвалів розкривних і скельних порід; 1 хвостовище відходів збагачення залізних руд	3 діючих кар'єри; 2 закритих кар'єри
3	Криворізька №3	12 відвалів розкривних і скельних порід; 1 хвостовище відходів збагачення	3 діючих кар'єри
4	Покровсько-Нікопольська	6 шламосховищ відходів збагачення марганцевих руд; 1 відвал металургійних шлаків	3 діючих кар'єри; 2 закритих кар'єри
5	Запорізька	5 відвалів металургійних шлаків; 5 відвалів розкривних порід	5 діючих кар'єрів
6	Завалівська	1 відвал розкривних і скельних порід; 1 хвостовище відходів збагачення графітової руди	1 діючий кар'єр
7	Дніпровська	3 золошламонакопичувача; 1 відвал розкривних порід; 1 відвал металургійних шлаків	3 діючих кар'єри; 1 закритий кар'єр
8	Горішнєплавенська	4 відвали розкривних і скельних порід; 1 хвостовище відходів збагачення залізних руд	4 діючих кар'єри; 1 тимчасово недіючий кар'єр
9	Маріупольська	1 відвал розкривних порід; 3 золошламонакопичувача; 4 відвали металургійних шлаків; 1 об'єкт накопичення некондиційного вапна	1 діючий кар'єр; 1 закритий кар'єр
10	Новотроїцько-Докучаєвська	12 відвалів розкривних порід	5 діючих кар'єрів; 1 закритий кар'єр
11	Краматорська	1 відвал розкривних порід; 3 відвали металургійних шлаків	1 діючий кар'єр
12	Лисичанська	2 відвали розкривних порід; 16 породних відвалів вугільних шахт; 1 золошламонакопичувач	1 діючий кар'єр; 2 закритих кар'єри

Слід зазначити, що концепція розвитку повного відновлення земної поверхні, порушеної гірничими роботами, у визначених потенційних системах можлива за умов синергетичної взаємодії державних органів влади та приватного бізнесу. Основним принципом повинні стати екологічна відповідальність, зменшення негативного впливу гірничодобувної галузі на навколишнє середовище та захист інтересів громадян, особливо у вельми техногенно навантажених регіонах.

Розроблену інформаційно-аналітичну карту, де розташовані накопичення промислових відходів, утворені кар'єрні пустоти і перспективні системи «кар'єрні пустоти – закладні матеріали», планується передати Міністерству екології та природних ресурсів, а також департаментам екології і природних ресурсів обласних державних адміністрацій. Інформаційно-аналітична карта дозволить сфокусувати увагу на вирішенні проблем порушень земної поверхні у конкретних промислових регіонах України, а також буде корисною для розвитку вельми потрібних екологічних програм за спільної участі органів влади (державних та регіональних) й приватного бізнесу щодо повного відновлення порушених гірничими роботами земель. Отриманий практичний результат є важливим підґрунтям для створення дієвого механізму та ефективних заходів з повного відновлення стану земної поверхні й системи управління промисловими відходами у визначених регіонах, що сприятиме зміцненню міжнародного іміджу України як відповідальної та екологічно усвідомленої країни.

## **Висновки**

У представленому дослідженні викладені методологічні інструментарії та підходи щодо уявлення та виявлення перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал» на території України для подальшого розвитку концепції та стратегії з відновлення земної поверхні, порушеної гірничими роботами.

Визначено, що аналітична оцінка розташування накопичень промислових відходів як потенційних закладних матеріалів і кар'єрів на території України на сьогодні не проведена і цим актуальним питанням приділено недостатньо уваги науковою спільнотою та органами державної влади. Також недостатньо вивченим є відновлення земної поверхні на основі формування стійкого закладного масиву у вироблених кар'єрних пустотах.

Розкрито теоретичне уявлення про системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал». Надана характеристика низки важливих умов гармонійного існування й ефективної реалізації визначених перспективних систем «кар'єрні пустоти – закладний матеріал», що дозволить оптимізувати процес закладання, знизити економічні витрати, забезпечити екологічну безпеку та отримати підтримку з боку суспільства й державних органів.

Викладено методологію створення основи інформаційно-аналітичної карти, яка полягала у виконанні послідовних етапів. Наведено принципи визначення і характеристики її основних складових елементів. Створено нову інформаційно-аналітичну карту просторового розташування потенційних закладних матеріалів та утворених кар'єрних пустот на території України, на основі якої визначені перспективні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал».

Встановлено, що на території України закладання виробленого простору кар'єрів для повного відновлення земної поверхні на сьогодні доцільно розглядати у 12 районах, де розташовано потенційні системи «кар'єрні пустоти – закладний матеріал». Визначеним системам умовно задано спеціальні назви: Криворізька №1, Криворізька №2, Криворізька №3, Покровсько-Нікопольська, Запорізька, Завалівська, Дніпровська, Горішнєплавенська, Маріупольська, Новотроїцько-Докучаєвська, Краматорська, Лисичанська. Отриманий практичний результат є важливим підґрунтям для створення дієвого механізму та ефективних заходів з повного відновлення стану земної поверхні та системи управління промисловими відходами у визначених регіонах, що сприятиме зміцненню міжнародного іміджу України як відповідальної й екологічно усвідомленої країни.

## Подяка

Дослідження виконані в рамках наукового грантового проєкту 2021.01/0306 «Розробка технології відновлення порушених гірничими роботами територій шляхом формування закладних масивів на основі природно-техногенних матеріалів» від Національного фонду досліджень України.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhang, B., Zhao, M., & Tu, Y. (2023). Sustainable development and resources extraction: A novel perspective for resources rich economies. *Resources Policy*, (83), 103595. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103595>
2. Brodny, J., & Tutak, M. (2022). Challenges of the polish coal mining industry on its way to innovative and sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, (375), 134061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134061>
3. Shtangret, A., Shliakhetko, V., & Mandzinovska, K. (2022). The mining industry: An information basis for changes in government regulation. *State and Regions. Series: Economics and Business*, 1(124), 61-66. <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2022-1-10>
4. ГМК Центр оцінює внесок ГМК в економіку України в 10,6%. *Електронний ресурс*. Режим доступу: <https://gmk.center/ua/news/gmk-center-ocinjuie-vnesok-gmk-v-ekonomiku-ukraini-v-10-6/>
5. *Мінеральні ресурси України*. (2021). Київ: Державне науково-виробниче підприємство «Державний інформаційний геологічний фонд України», 270 с.
6. Hunko, L., & Berezhna, K. (2021). Problems regarding treatment of disturbed land in Ukraine. *Zemleustriy, Kadastr i Monitoring Zemel'*, (2), 1-14. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2021.02.06>
7. Чабаненко, М.М., Волох, П.В., & Левченко, В.Р. (2020). Юридична категорія «рекультивация земель»: сучасні науково-правові підходи до законодавства. *Юридичний науковий електронний журнал*, (4), 110-114. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2020-4/25>
8. Wang, H., Qi, Y., Zhang, J., Zhang, J., Yang, R., Guo, J., Luo, D., Wu, J., & Zhou, S. (2022). Influence of open-pit coal mining on ground surface deformation of permafrost in the Muli region in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Remote Sensing*, 14(10), 2352. <https://doi.org/10.3390/rs14102352>
9. Антонік, В.І., Петрухін, А.В., & Антонік, І.П. (2017). Вплив відвалів та хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Криворіжжя на стан екології прилеглих територій. *Вісник Криворізького національного університету*, (44), 161-166.

10. Vriens, B., Plante, B., Seigneur, N., & Jamieson, H. (2020). Mine waste rock: Insights for sustainable hydrogeochemical management. *Minerals*, 10(9), 728. <https://doi.org/10.3390/min10090728>
11. Hrinov, V.H., Khorolskyi, A.O., & Kaliushchenko, O.P. (2019). Elaboration of environmental scenarios for the effective development of valuable mineral deposits. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 46-50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
12. Xue, G., Yilmaz, E., & Wang, Y. (2023). Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 30(8), 1455-1473. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2663-0>
13. Behera, S.K., Mishra, D.P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S.K., Ghosh, C.N., Kumar, R., & Mandal, P.K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, (309), 125120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125120>
14. Кузьменко, О.М., & Петльованій, М.В. (2017). Стійкість штучного масиву при підземній розробці потужного рудного покладу на великій глибині. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (50), 56-62.
15. Корсунський, Г.Я., Павличенко, А.В., & Конопльова, О.О. (2018). Дослідження технології гірничотехнічної рекультивациі в процесі відкритої розробки пологих родовищ. *Геотехнічна механіка*, (139), 195-204.
16. Собко, Б.Ю., Ложніков, Ю.В., & Романченко, Ю.В. (2015). Обґрунтування параметрів технологічних схем гірничотехнічної рекультивациі обводнених залишкових вироблених просторів кар'єрів. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (48), 88-95.
17. Villain, L., Alakangas, L., & Öhlander, B. (2013). The effects of backfilling and sealing the waste rock on water quality at the Kimheden open-pit mine, northern Sweden. *Journal of Geochemical Exploration*, (134), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.003>
18. Гайко, Ю.І., Гнатченко, Є.Ю., Завальний, О.В., & Шишкін, Е.А. (2021). *Реновациія промислової забудови та її адаптациія до сучасного міського середовища*. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 353 с.
19. Petlovanyi, M., Chebanov, M., & Sherstiuk, Y. (2023). Formation of a backfill mass as an effective method of mining-technical reclamation when rehabilitating lands disturbed by mining. *Materials of the Scientific Collection "InterConf"*, (164), 177-182.
20. Петльованій, М.В., Сай, К.С., Борисовська, О.О., & Хорольський, А.О. (2023). Аналіз використання промислових відходів для формування закладних масивів у техногенних пустотах. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(10), 115-126. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-115-126>

Стаття надійшла до редакції 24.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 14.11.2023

## REFERENCES

1. Zhang, B., Zhao, M., & Tu, Y. (2023). Sustainable development and resources extraction: A novel perspective for resources rich economies. *Resources Policy*, (83), 103595. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103595>
2. Brodny, J., & Tutak, M. (2022). Challenges of the polish coal mining industry on its way to innovative and sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, (375), 134061. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134061>
3. Shtangret, A., Shliakhetko, V., & Mandzinovska, K. (2022). The mining industry: An information basis for changes in government regulation. *State and Regions. Series: Economics and Business*, 1(124), 61-66. <https://doi.org/10.32840/1814-1161/2022-1-10>
4. GMK Center estimates the contribution of GMK to the economy of Ukraine at 10.6%. Retrieved from: <https://gmk.center/ua/news/gmk-center-ocinjuie-vnesok-gmk-v-ekonomiku-ukraini-v-10-6/> [in Ukrainian].

5. *Mineral resources of Ukraine*. (2021). Kyiv: State Scientific and Production Enterprise "State Geological Information Fund of Ukraine", 270 p.
6. Hunko, L., & Berezna, K. (2021). Problems regarding treatment of disturbed land in Ukraine. *Zemleustrij, Kadastr i Monitoring Zemel'*, (2), 1-14. <https://doi.org/10.31548/zemleustriy2021.02.06>
7. Chabanenko, M.M., Voloh, P.V., & Levchenko, V.R. (2020). Legal category "land reclamation": Modern scientific and legal approaches to legislation. *Legal Scientific Electronic Journal*, (4), 110-114 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2020-4/25>
8. Wang, H., Qi, Y., Zhang, J., Zhang, J., Yang, R., Guo, J., Luo, D., Wu, J., & Zhou, S. (2022). Influence of open-pit coal mining on ground surface deformation of permafrost in the Muli region in the Qinghai-Tibet Plateau, China. *Remote Sensing*, 14(10), 2352. <https://doi.org/10.3390/rs14102352>
9. Antonik, V.I., Petrukhin, A.V., & Antonik, I.P. (2017). Impact of dumps and tailings storage facilities of Kryvorizhia mining and beneficiation plants on the state of ecology of the surrounding areas. *Bulletin of Kryvyi Rih National University*, (44), 161-166 [in Ukrainian].
10. Vriens, B., Plante, B., Seigneur, N., & Jamieson, H. (2020). Mine waste rock: Insights for sustainable hydrogeochemical management. *Minerals*, 10(9), 728. <https://doi.org/10.3390/min10090728>
11. Hrinov, V.H., Khorolskyi, A.O., & Kaliushchenko, O.P. (2019). Elaboration of environmental scenarios for the effective development of valuable mineral deposits. *Mineral Resources of Ukraine*, (2), 46-50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>
12. Xue, G., Yilmaz, E., & Wang, Y. (2023). Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 30(8), 1455-1473. <https://doi.org/10.1007/s12613-023-2663-0>
13. Behera, S.K., Mishra, D.P., Singh, P., Mishra, K., Mandal, S.K., Ghosh, C.N., Kumar, R., & Mandal, P.K. (2021). Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*, (309), 125120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125120>
14. Kuzmenko, O.M., & Petlyovanyi, M.V. (2017). Stability of the artificial massif during the underground mining of a powerful ore deposit at a great depth. *Collection of Scientific Papers of the National Mining University*, (50), 56-62.
15. Korsunskyi, H.Ya., Pavlychenko, A.V., & Konoplyova, O.O. (2018). Research of the technology of mining reclamation in the process of open pit mining of gentle deposits. *Geotechnical Mechanics*, (139), 195-204.
16. Sobko, B.Yu., Lozhnikov, Yu.V., & Romanchenko, Yu.V. (2015). Justification of parameters of technological schemes of mining reclamation of watered residual produced spaces of quarries. *Collection of Scientific Papers of the National Mining University*, (48), 88-95.
17. Villain, L., Alakangas, L., & Öhlander, B. (2013). The effects of backfilling and sealing the waste rock on water quality at the Kimheden open-pit mine, northern Sweden. *Journal of Geochemical Exploration*, (134), 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.003>
18. Hayko, Yu.I., Hnatchenko, Ye.Yu., Zavalnyi, O.V., & Shishkin, E.A. (2021). Renovation of industrial buildings and their adaptation to the modern urban environment. Kharkiv: O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, 353 p.
19. Petlovanyi, M., Chebanov, M., & Sherstiuk, Y. (2023). Formation of a backfill mass as an effective method of mining-technical reclamation when rehabilitating lands disturbed by mining. *Materials of the Scientific Collection "InterConf"*, (164), 177-182.
20. Petlovanyi, M., Sai, K., Borysovska, O., & Khorolskyi, A. (2023). Analysis of the use of industrial waste for the formation of backfill mass in man-made voids. *Naukovyi Visnyk Donetskooho Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu*, 1(10), 115-126 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31474/2415-7902-2023-1-115-126>

*The article was received 24.08.2023 and was accepted after revision 14.11.2023*

**Петльований Михайло Володимирович**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Адреса робоча:** 49005, Україна, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8911-4973> **e-mail:** petlovanyi.m.v@nmu.one

**Сай Катерина Сергіївна**

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої інженерії та освіти, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Адреса робоча:** 49005, Україна, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1488-3230> **e-mail:** sai.k.s@nmu.one

**Попович Василь Васильович**

доктор технічних наук, професор, т.в.о. проректора з науково-дослідної роботи, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності

**Адреса робоча:** 79007, Україна, м. Львів, вул. Клепарівська, 35

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2857-0147> **e-mail:** popovich2007@ukr.net

**Чебанов Максим Олександрович**

доктор філософії, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Адреса робоча:** 49005, Україна, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6681-2701> **e-mail:** chebanov.m.o@nmu.one



УДК: 551.577.1

**Olha Bohomaz**, PhD, Associate Professor of the Department of Environmental Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8521-0394> **e-mail:** [olha.bohomaz@donntu.edu.ua](mailto:olha.bohomaz@donntu.edu.ua)

**Viktor Kostenko**, Dr, Prof., Head of the Department of Environmental Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8439-6564> **e-mail:** [vk.kostenko@gmail.com](mailto:vk.kostenko@gmail.com)

**Maryna Tavrel**, Assistant of the Department of Environmental Protection  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7666-4554> **e-mail:** [maryna.tavrel@donntu.edu.ua](mailto:maryna.tavrel@donntu.edu.ua)

**Krystyna Hlavatskykh**, student  
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-9033-2764>  
**e-mail:** [krystyna.hlavatskykh.gf@donntu.edu.ua](mailto:krystyna.hlavatskykh.gf@donntu.edu.ua)

SHEI «Donetsk National Technical University», Lutsk, Ukraine

## **ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF THE CITY OF POKROVSK FOR THE ACCUMULATION AND USE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION**

**Abstract.** *The problem of water shortage in the city of Pokrovsk, Donetsk region, requires the search for alternative sources of water supply, especially for the needs of industry and agriculture. Atmospheric precipitation is considered as an alternative source. However, at the stage of choosing and developing a method of managing rainwater from an urbanized area and implementing technical means for its accumulation, storage, and use, it is important to assess the quantitative indicators of stormwater runoff. Research is aimed at substantiating the possibility of using atmospheric precipitation as an auxiliary source of water supply for industrial-communal, domestic, and agricultural needs based on statistical determination of the dynamics of precipitation on the territory of the city of Pokrovsk. Changes in rainwater runoff parameters were determined based on the analysis of the meteorological data archive for the period 1985–2022. The study found that the city of Pokrovsk has the potential for wastewater accumulation. The city has a tendency to increase the frequency of high-intensity storms with a 34.89% increase in the average height of the precipitation layer for one abnormal rainy day. Over the period 2004–2022, the average annual and annual rainfall per rainy day increased slightly by 0.56% and 6.23%, respectively, compared to the same period in the previous year (1985–2003), while the average number of rainy days per year decreased by 5.25%. The dynamics of annual volumes of surface wastewater indicates the need to improve the city's rainwater accumulation system, which should provide a 35% increase in the current flow rate of abnormal rainfall and eliminate the risk of flooding. To do this, the storage capacity should be increased by deepening the city pond "Nulyovka" and the ridge located downstream. It is expedient for private households to create individual sediment accumulators.*

**Keywords:** *rainfall; urban wastewater accumulation system; alternative water supply.*

О.П. Богомаз, В.К. Костенко, М.І. Таврель, К.М. Главатських

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Луцьк, Україна

## АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ МІСТА ПОКРОВСЬК ЩОДО НАКОПИЧЕННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ АТМОСФЕРНИХ ОПАДІВ

***Анотація.** Проблема дефіциту води у місті Покровськ Донецької області вимагає пошуку альтернативних джерел водопостачання, особливо для потреб промисловості та агропромислового комплексу. Як альтернативне джерело розглядаються атмосферні опади. Однак на етапі вибору та розробки способу управління дощовою водою з урбанізованої території та впровадження технічних засобів щодо їх накопичення, зберігання та використання важливою є оцінка кількісних показників зливових стоків в даному місці із заданим режимом водозбору. Дослідження спрямовані на обґрунтування можливості використання атмосферних опадів в якості допоміжного джерела водопостачання на промислово-комунальні, побутові та аграрні потреби на основі статистичного визначення динаміки надходження осадів на територію міста Покровськ. Визначення зміни параметрів дощових стоків проводилися на підставі аналізу архіву метеорологічних даних за період 1985–2022 роки.*

*В ході дослідження встановлено, що місто Покровськ має потенціал до накопичення стоків. В місті простежується тенденція щодо зростання частоти злив високої інтенсивності зі збільшенням на 34,89% середньої висоти шару опадів за один аномальний дощовий день. За період 2004–2022 роки середня висота шару опадів за рік та за один дощовий день незначно збільшилися на 0,56% та 6,23% відповідно у порівнянні з аналогічним попереднім періодом (1985–2003), при цьому середня кількість дощових днів за рік зменшилась на 5,25%.*

*Динаміка річних обсягів поверхневих стічних вод вказує на необхідність удосконалення міської системи акумулювання дощової води, яка має забезпечувати збільшену на 35% від сучасної витрати стоків аномальних дощів і виключити небезпеку підтоплення території. Для цього слід збільшити накопичувальну спроможність заглибленням міського ставка «Нульовка» та гряди розташованих нижче за течією. Приватним домогосподарствам доцільно створювати індивідуальні накопичувачі осадів.*

***Ключові слова:** дощові опади; міська система акумулювання стоків; альтернативне водопостачання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.48-61>

### Вступ

Донеччина є одним з найменш забезпечених водними ресурсами регіонів України. Це пов'язано з тим, що регіон розташований вздовж Донецького кряжу на водорозділі басейнів основних річок Сіверського Донця і Дніпра. Ці ріки, а також відносно крупні Міус і Кальміус та дрібніші, виносять свої води до Азовського і Чорного морів. Основним і майже єдиним постачальником води є Сіверський Донець. Деяка частина притоку води забезпечується високо мінералізованими шахтними стоками, що потрапляють з надр і суттєво забруднюють гідрографічну мережу. Планувалось створення потужного водогону з Дніпра, але за останні десятиріччя ця, майже добудована, споруда розграбована. Вагомим джерелом водопостачання слід вважати атмосферні опади.

Густина населення в Донбасі, за довоєнними показниками, була найвищою в Україні. Але забезпеченість питною водою завжди була недостатньою. Висока концентрація видобувних, металургійних, хімічних, переробних, транспортних та інших підприємств – споживачів водних ресурсів – визначила хронічний дефіцит технологічної якості води. Значна частина втрат дощових опадів, особливо при інтенсивних зливах, обумовлена суглинковим складом верхнього шару ґрунтів Донбасу. Наявність глинистих схильних до розбухання під впливом води часток у складі поверхневого шару ґрунту визначає малу величину фільтрації і, відповідно, малу проникливість води до нижчих шарів. Значна частина інтенсивних опадів випаровується або стікає по непроникливому для води шару ґрунту до річок та ручаїв, не потрапляючи до кореневих систем рослин. Внаслідок нестабільності літніх опадів та нестачі поливних вод Донеччина – зона ризикованого землеробства.

Водні ресурси Донбасу депонуються у водосховищах (Карлівське, Клебан-Бикське та інші) і використовуються населенням у господарсько-побутових цілях, для пиття, агропромисловими підприємствами, а також хімічними, металургійними та енергетичними підприємствами у технологічних процесах. Деякі промислові підприємства створюють власні спеціалізовані водойми, наприклад ставки-охолоджувачі для Курахівської, Зуєвської і низки інших ТЕС, гряда міських ставків Донецького металургійного заводу та тому подібні.

Серйозні проблеми із забезпеченням регіону водою посилились у 2014 році з початком військової агресії проти України. Постійні обстріли водорозподільних та фільтрувальних станцій призвели до відсутності централізованого водопостачання (впродовж 1–2 місяців, а інколи й більше) у невеликих населених пунктах західної та південно-західної частини Донецької області. Після лютого 2022 року внаслідок військових дій було повністю знищено значну кількість гідротехнічних споруд, що, своєю чергою, спричинило обміління Сіверського Донця та, відповідно, прилеглих до нього водосховищ та малих річок.

Ситуація посилилася кліматичними особливостями регіону – спекотним літом з обмеженою кількістю атмосферних опадів. В результаті більшість промислових підприємств та майже 80% населення регіону залишилися без централізованого та якісного водопостачання. Погіршення урбоекологічної обстановки призвело, наприклад, до зростання, без того, найвищого у державі рівня захворюваності населення на нирковокам'яну та сечокам'яну хвороби.

Наразі проблема забезпечення водою населення регіону вирішується локально – шляхом буріння свердловин, але це повною мірою не вирішує проблему, оскільки стихійне їх буріння призводить до зміни гідрологічного режиму водоносних шарів, як наслідок – рівень води у колодязях та свердловинах значно знижується, а в деяких місцях вода повністю зникає. До того ж вода зі свердловин, через близьке розташування шахтних вод високої мінералізації, забруднена різноманітними розчиненими мінеральними домішками, а тому без додаткового очищення не може використовуватися в агропромисловому секторі та промисловості.

Важливим залишається розширення водних ресурсів Донбасу як за рахунок удосконалення існуючих, так й шляхом пошуку альтернативних джерел водопостачання, особливо для потреб промисловості та агропромислового

комплексу. Найбільш актуальною стала необхідність забезпечення питних та комунальних потреб населення у населених пунктах, місцях проживання та міграції в умовах військових дій.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Дефіцит чистої води на планеті постійно спонукає науковців до пошуку альтернативних джерел водопостачання. Водночас зміна клімату та збільшення кількості повеней, які спричиняють серйозні екологічні, соціальні та економічні збитки, призвели до загострення проблеми управління ресурсами дощової води. Опади стали розглядати як цінний ресурс, яким необхідно розумно керувати, задля зменшення ризику повені, протидії посуші, покращення якості життя на урбанізованих територіях. Археологічні дослідження вказують на наявність подібних древніх технологій на Близькому Сході та у індіанців Майя.

Сучасний досвід використання дощової води у різних країнах свідчить про перспективність цього напрямку. Так, у місті Турін (Італія) створено домові системи збору дощової води, яку надалі використовують для побутових потреб (наприклад, змив туалету, прання одягу, миття підлог та автомобілів), а також для загального використання (зрошення зелених зон міста, миття вулиць) [1], при цьому економиться 29–62% чистої питної води. В Іспанії, Франції, Германії зі всіх нетрадиційних водних ресурсів використання дощової води для побутових непитних цілей є найпопулярнішим варіантом серед місцевого населення [2]. В Нігерії, африканській країні з дуже посушливим кліматом, але з наявністю періоду затяжних опадів, дощову воду використовують для потреб сільського господарства [3].

Системи, що використовуються для збору та накопичення дощових вод, дуже різняться за своїми конструктивними параметрами та призначенням.

За призначенням всі традиційні системи збору атмосферних опадів поділяються на загальноміські та індивідуальні (домові). Загальноміські системи збору дощових опадів – це так звані зливові каналізації, їх будівництво на території вже існуючого міста передбачає значні капітальні затрати. Зібрана таким чином дощова вода потребує додаткового очищення, оскільки стікання по урбанізованій території призводить до забруднення її завислими речовинами, нафтопродуктами, важкими металами та іншими шкідливими хімічними сполуками. Важливим є визначення конструктивних параметрів таких систем в цілях безперебійного уловлювання, накопичення і транспортування опадів при екстремальних показниках випадання вологи.

Індивідуальні системи передбачають збір дощової води з дахів, терас, дворів та інших твердих непроникних поверхонь у спеціальні накопичувальні баки. Така вода не потребує глибокого очищення, достатньо лише застосувати фільтр для вилучення грубого завислого сміття (палки, листя, комахи). Показовою країною в плані застосування домових систем збору дощової води є Австралія. Так, близько 1,7 млн австралійських домогосподарств мають резервуари для дощової води, які забезпечують від 8% до 14% води, що використовується для побутових потреб [4–5].

У розвинутих країнах досить поширеним є комбінація загальноміських та індивідуальних систем збору води. Це поєднання дозволяє використовувати до 90–95% всіх опадів.

Основним фактором, який обумовлює використання певної системи збору атмосферних опадів, є регіональні кліматичні умови. Тому на етапі вибору та розробки способу управління дощовою водою з урбанізованої території та впровадження технічних засобів щодо їх накопичення, зберігання та використання важливою є оцінка кількісних показників зливових стоків в даному місці із заданим режимом водозбору.

### **Мета та завдання дослідження**

Метою досліджень є обґрунтування можливості використання атмосферних опадів в якості допоміжного джерела водопостачання на промислово-комунальні, побутові та аграрні потреби на основі статистичного визначення динаміки надходження опадів на територію міста Покровськ.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних завдань:

- виявлення на основі статистичного аналізу тенденції щодо зміни за останні десятиріччя висоти річного шару опадів, також флуктуації максимальних добових шарів опадів;
- визначити потенціал річного обсягу поверхневих стічних вод, що утворюється на території м. Покровськ;
- обґрунтувати можливості раціонального використання атмосферних опадів у міському та приватних господарствах.

### **Методика досліджень**

Метою було, на основі статистичного аналізу, виявлення тенденції щодо зміни висот річного шару опадів, також максимальних добових шарів опадів різної повторюваності. Джерелом інформаційних досліджень був метеорологічний архів сайту Meteoblue [6].

Для отримання більш вірогідних даних досліджуваний період (38 років) було поділено на два рівні часові відрізки по 19 років кожний: I – 1985–2003, II – 2004–2022 роки. По кожному періоду було визначено середню кількість дощів за рік, середню висоту шару опадів за рік ( $H_{\text{ср}}$ , мм/рік), середню добову висоту шару опадів за один дощовий день ( $h_{\text{ср,д}}$ , мм/добу) та середню висоту шару опадів, що припадає на одну добу календарного року ( $h_{\text{к}}$ , мм/добу). Також було проаналізовано та визначено кількість дощових днів з аномальною кількістю опадів (коли за добу випадає півмісячна норма опадів) ( $N$ ) і, відповідно, розраховано середню висоту шару опадів за один аномальний дощовий день ( $H_N$ , мм/добу).

На другому етапі досліджень було проаналізовано річний обсяг поверхневих стічних вод, що утворюється на території м. Покровськ.

Річний обсяг поверхневих стічних вод, що утворюються на території водозбору, визначали як суму поверхневого стоку за теплий (квітень-жовтень) та холодний (листопад-березень) періоди року із загальної площі водозбору об'єкта, а також з врахуванням об'єму поливо-мийних вод:

$$W = W_D + W_C + W_M, \quad (1)$$

де  $W_D$  – середньорічний об'єм стоку, що утворився під час випадання дощу у теплий період року, м<sup>3</sup>/рік;

$W_C$  – середньорічний об'єм стоку, що утворився внаслідок танення снігу у холодний період року, м<sup>3</sup>/рік;

$W_M$  – річний об'єм поливо-мийних вод, м<sup>3</sup>/рік.

Через дефіцит води у місті поливо-мийні роботи протягом теплового періоду року майже не проводяться, тому при обчислюванні річного обсягу поверхневих стічних вод показник  $W_M$  не враховували.

Середньорічний обсяг дощових ( $W_D$ ) та талих ( $W_C$ ) вод, в м<sup>3</sup>, визначали за формулами [7]:

$$W_D = 0,1 \cdot h_D \cdot Y_D \cdot F, \quad (2)$$

$$W_C = 0,1 \cdot h_C \cdot Y_C \cdot F, \quad (3)$$

де  $h_D, h_C$  – середньорічна висота шару опадів за теплий та холодний періоди року, відповідно, мм;

$F$  – розрахункова площа стоку, га;

$Y_D, Y_C$  – загальний коефіцієнт стоку дощових та талих вод відповідно.

Інтенсивність випадіння опадів на значних територіях характеризується просторовою нерівномірністю, тому при обчислюванні кількісних показників опадів, для басейнів стоку площею понад 500 га, рекомендовано використовувати понижувальний коефіцієнт  $k$ , який з достатньою точністю (коефіцієнт детермінованості  $R^2 = 0,9885$ ) описано лінійним трендом [8]:

$$k = 0,951 - 4,2 \cdot 10^{-5} \cdot F.$$

Для дощового стоку міста Покровськ коефіцієнт  $k$  дорівнюватиме

$$k = 0,951 - 4,2 \cdot 10^{-5} \cdot 2957 = 0,83,$$

відповідно формули (2) та (3) матимуть вигляд:

$$W_D = 0,1 \cdot h_D \cdot Y_D \cdot 0,83 \cdot F; \quad (4)$$

$$W_C = 0,1 \cdot h_C \cdot Y_C \cdot 0,83 \cdot F. \quad (5)$$

### Виклад основного матеріалу

Місто Покровськ, площею 29,57 км<sup>2</sup> та населенням 60 127 осіб (станом на 2022 р.), розташоване в західній частині Донецької області і є адміністративним центром Покровської міської територіальної громади. Місто є типовим для Донбасу за населеністю, водоспоживанням, кліматом, промисловістю тощо, подібним до більшості міст з населенням до 100 тис. осіб, в яких проживає приблизно 80% населення Донбасу.

Промисловий комплекс міста представлений гірничодобувною, вогнетривкою, харчовою та сільськогосподарською промисловістю. Основну роль в промисловості міста відіграють вугледобувне підприємство

ПрАТ «ШУ «Покровське» та підприємство з виготовлення вогнетривких виробів – ПрАТ «КДЗ», вони є не лише великими споживачами чистої води, але й основними забруднювачами довкілля.

Особливістю м. Покровськ та розташованих поблизу нього населених пунктів є відсутність таких, що знаходяться поблизу, джерел питної води. Міський ставок «Нульовка» має середню глибину близько двох метрів, влітку вода інтенсивно прогривається і непридатна для купання. Він та розташовані нижче за течією інші подібні ставки поповнюються переважно каналізаційними та поверхневими стічними водами і в літню пору інтенсивно «квітнуть». Певне самоочищення води у ставках відбувається за рахунок прибережної рослинності – рогозу, очерету тощо [9].

Для забезпечення водою населення та підприємств використовують водогін від Карлівського водосховища протяжністю понад 40 км. У час війни насосні та фільтрувальні установки часто піддаються обстрілам та ушкодженням, що призводить до значних перебоїв у водопостачанні від кількох діб до місяця. Якість води у водопроводі не завжди забезпечується на потрібному рівні. Для пиття населення переважно купує воду у пляшках або доочищену воду, що розвозять у цистернах.

Функціонально-морфологічна структура міста Покровськ є неоднорідною. Близько 30% площі міста ( $\approx 9 \text{ км}^2$ ) займає промислова та паркова зона, на долю багатопверхової забудови припадає лише 10% ( $\approx 3 \text{ км}^2$ ) площі, значну ж частину площі міста, близько 60% ( $\approx 17 \text{ км}^2$ ), складають приватні забудови з присадибними територіями. Околиці міста оточують дачні садові й городні ділянки (рис. 1). У посушливі періоди (наприклад, відсутність дощів з травня по жовтень 2020 року) відчувається гострий дефіцит поливної води через падіння тиску у водопроводі і зниження водних горизонтів у свердловинах. Врожайність суттєво знижується, це визначає значну економічну та побутову проблему для населення.

Для визначення зміни параметрів випадіння атмосферних опадів у місті Покровськ Донецької області було проведено статистичну обробку рядів гідрометеорологічних спостережень за добовою висотою шару атмосферних опадів за період з 1985 по 2022 роки (табл. 1).

Проведення порівнянь за відносно значний період щорічних спостережень, який дорівнює приблизно двом десятиріччям, дозволяє мати більш надійні результати. Отримані показники свідчать про те, що за останні майже два десятиріччя (2004–2022 роки) середня кількість дощів за рік зменшилась на 5,25% відносно попередніх (1985–2003). У той же строк середня висота шару опадів за рік та за один дощовий день незначно збільшилися на 0,56% та 6,23% відповідно. Натомість за останні 19 років спостерігається збільшення частоти випадання злив високої інтенсивності, коли за один дощовий день випадає півмісячна норма опадів. Якщо в 1985–2003 роках в середньому кожен п'ятий дощ був аномальним, то у 2004–2022 роках – в середньому кожен третій. Окрім частоти випадіння злив високої інтенсивності, на 34,89% збільшилась й середня висота шару опадів за один аномальний дощовий день.

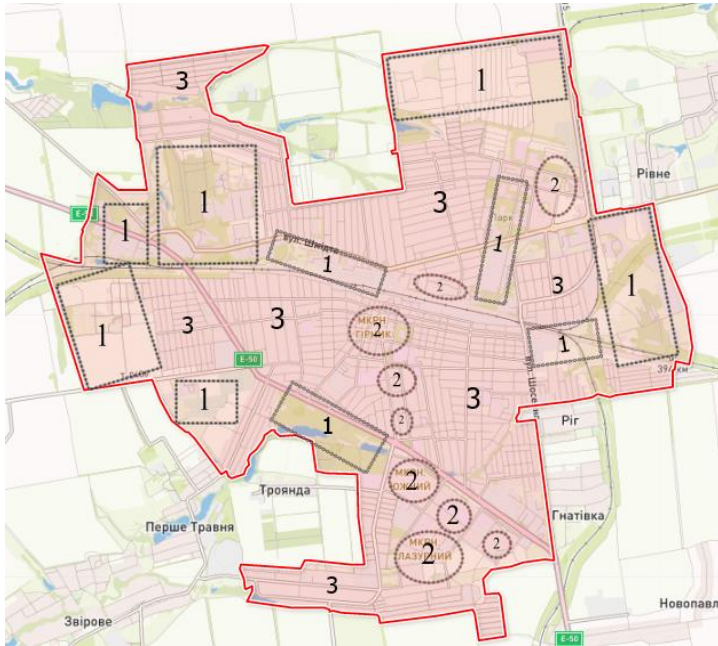


Рис. 1. Функціонально-морфологічна структура міста Покровськ: 1 – промислова та паркова зона; 2 – багатоповерхова забудова; 3 – приватна забудова

Таблиця 1. Показники опадів у місті Покровськ за період з 1985 по 2022 роки

№	Період	Повних років досліджень	Середня кількість дощових днів за рік	Висота шару опадів, мм			N	H <sub>N</sub> , мм/добу
				H <sub>ср</sub>	h <sub>ср.д</sub>	h <sub>к</sub>		
1	1985–2003	19	154,53	496,32	3,21	1,359	33	22,10
2	2004–2022	19	146,42	499,11	3,41	1,367	51	29,81
3	1985–2022	38	150,47	497,72	3,31	1,36	84	26,78

N – кількість дощових днів з аномальною кількістю опадів;

H<sub>N</sub> – середня висота шару опадів за один аномальний дощовий день

Таким чином можна стверджувати, що витратні показники річних опадів у м. Покровськ за зазначений період змінились незначно, однак, інтенсивність аномальних опадів мала тенденцію до зростання близько на третину. Це важливо враховувати при проектуванні локальних накопичувачів дощових стоків.

При розрахунку середньорічного обсягу дощових та талих вод важливе значення має коефіцієнт стоку (Y<sub>д</sub>, Y<sub>с</sub>). У теплий період року даний коефіцієнт враховує втрати на початкове затримання, інфільтрацію та випаровування і залежить від типу поверхневого покриття, а в холодний період – вивіз снігу та часткове поглинання водопроникними поверхнями.



Згідно з діючими в Україні методиками та нормативними документами, що використовуються для розрахунку обсягів дощового стоку, числові значення коефіцієнта стоку дуже різняться. Авторами [10] було проаналізовано чотири основні методики та визначено, що найбільш інформативними щодо визначення коефіцієнта стоку є "Правила користування системами централізованого комунального водопостачання та водовідведення в населених пунктах України" [11]. Відповідно до цього, коефіцієнт стоку талих вод  $Y_C = 0,6$ , а коефіцієнт стоку дощових вод різниться від 0,1 для газонів, до 0,7 для удосконалених покриттів (дахи й асфальтобетонні покриття). Через важкість підрахунку точної площі покриттів різної категорії застосовується загальний коефіцієнт стоку дощових вод, який для середніх міст, з населенням 50–250 тис. осіб, становить  $Y_D = 0,45$ .

На підставі метеорологічного архіву за період 1985–2022 роки було визначено, що середньорічна висота шару опадів за теплий період року становить  $h_D = 39,69$  мм, а за холодний період року –  $h_C = 43,98$  мм. Таким чином, середньорічний обсяг дощових ( $W_D$ ) та талих ( $W_C$ ) вод, а також річний обсяг поверхневих стічних вод становитиме:

$$\begin{aligned}W_D &= 0,1 \cdot 39,69 \cdot 0,45 \cdot 0,83 \cdot 2957 = 4383,52 \text{ м}^3/\text{рік}, \\W_C &= 0,1 \cdot 43,98 \cdot 0,6 \cdot 0,83 \cdot 2957 = 6476,43 \text{ м}^3/\text{рік}, \\W &= 4383,52 + 6476,43 = 10859,95 \text{ м}^3/\text{рік}.\end{aligned}$$

Аналіз гідротехнічної мережі міста Покровськ свідчить про те, що в місті наразі відсутня централізована система збору зливових стоків, відповідно, нерідко спостерігається підтоплення центральної частини міста, яка є найнижчою точкою. Збільшення дощових днів з аномальною кількістю опадів вже зараз спричиняє появу небажаних екологічних та економічних наслідків, надалі ситуація буде лише погіршуватися, особливо критичною вона стане для видозмінених (техногенних) ландшафтів з високою щільністю забудови [12]. Тому важливим є створення та впровадження в місті системи акумулювання дощової води з метою подальшого її використання для різних галузей народного господарства.

Впровадити єдину загальноміську систему збору дощового стоку, яка б охоплювала всю частину міста, особливо приватний сектор, наразі є неможливим, оскільки це пов'язано зі значними капітальними затратами. Тому слід розглянути комбіновану систему збору дощової води, яка включатиме збір стоків з центральних вулиць міста, де розташовані багатоповерхівки, та індивідуальний збір води приватними домогосподарствами.

Дощову воду, зібрану загальноміськими системами збору, доцільно направляти у ставок «Нульовка», що розташований у парковій зоні міста, однак для цього потрібно збільшити обсяг ставка за рахунок поглиблення. Наразі частина опадів вже потрапляє в цей ставок, але через обмеженість об'єму ставка, в період інтенсивних злив, спостерігається явище повіддя. Акумульовану таким чином воду можна використовувати на поливо-мийні роботи, які, як зазначалось вище, через дефіцит води в місті майже не проводяться. Також слід розглянути можливість застосування акумульованого дощового стоку для розбавлення агресивних шахтних вод і, за умови

отримання води належної якості, передавати останню сільськогосподарським підприємствам, що розташовані поблизу міста.

Необхідно впроваджувати міри з попереджування евтрифікаційних процесів у ставках-накопичувачах опадів. Для цього доцільно встановлювати системи аерації, які, в цілях економії, використовують для роботи вітрову енергію (рис. 2) [13].

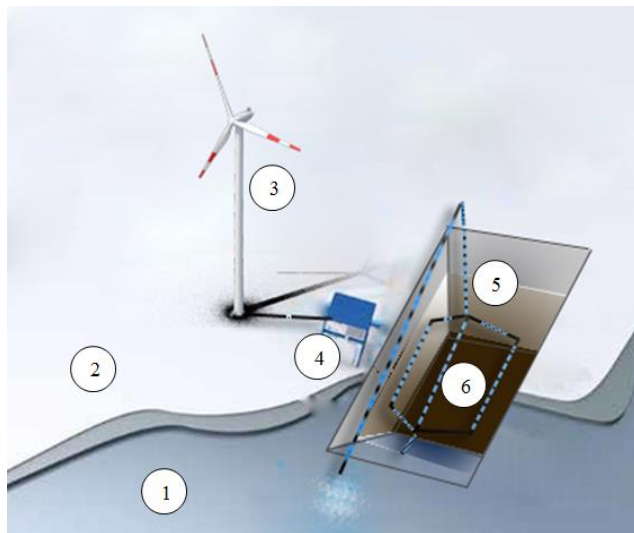


Рис. 2. Конструкція системи аерації водойм із застосуванням вітрової енергії: 1 – водойма; 2 – ґрунт; 3 – вітряк; 4 – компресор; 5 – установка з аерації; 6 – труби геотермальної системи для терморегуляції води [14]

Проаналізувавши кількість дощових днів у м. Покровськ по сезонах, було визначено, що середня кількість дощових днів у холодний сезон становить 76,58 днів, а у теплий – 73,89 дні, при цьому видно, що майже половина річного обсягу опадів випадає саме у вегетаційний період, але випадають вони переважно у вигляді злив, внаслідок чого обмежено впливають на забезпечення рослин водою (рис. 3).

Відомо, що вегетаційний період в Донецькій області характеризується двома періодами посухи: 1 – кінець квітня-травень, 2 – серпень-вересень. Ситуація в цей період погіршується наявністю суховіїв, кількість яких сягає понад 70 днів на рік, що є найвищим показником для України (для прикладу, Київська область – до 20 днів на рік, Львівська – 5–10 днів на рік) [15]. Суховії не лише призводять до вітрової ерозії ґрунтів, а й у 2–3 рази збільшують коефіцієнти водоспоживання рослин. Тому для отримання високої врожайності сільськогосподарських культур слід забезпечити безперервно рослини водою протягом усього вегетаційного періоду. Вирішити цю проблему можна за рахунок впровадження систем акумулювання дощових опадів приватними домогосподарствами. Зібрана дощова вода дозволить заповнити дефіцит паливної води в посушливий період та знизити навантаження на міську централізовану систему водопостачання.

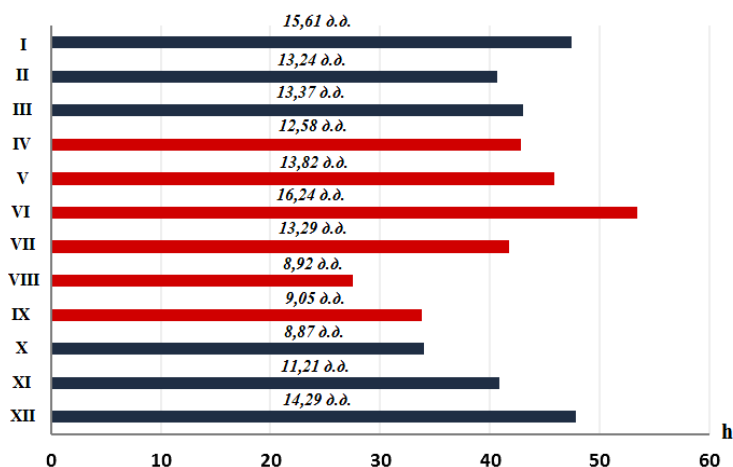


Рис. 3. Середньомісячна кількість опадів за період 1985–2022: д.д. – кількість дощових днів, h – середньомісячна кількість опадів, мм/міс, I–XII – місяці року

## Висновки

Проведений статистичний аналіз метеорологічних даних за період 1985–2022 роки м. Покровськ Донецької області дозволив отримати наступні висновки.

- За період 2004–2022 роки середня висота шару опадів за рік та за один дощовий день незначно збільшилися на 0,56% та 6,23% відповідно у порівнянні з аналогічним попереднім періодом (1985–2003), при цьому середня кількість дощових днів за рік зменшилась на 5,25%.

- Простежується тенденція щодо зростання частоти злив високої інтенсивності зі збільшенням на 34,89% середньої висоти шару опадів за один аномальний дощовий день.

- З урахуванням просторової нерівномірності випадіння опадів визначено, що в середньому річний обсяг поверхневих стічних вод у місті Покровськ становить  $W = 10859,95 \text{ м}^3/\text{рік}$ , при цьому кількість вод, що утворюється у холодний період (талі води), на 1,48 рази більше від кількості дощових вод, що утворюється у теплий період року.

- Атмосферні опади доцільно розглядати як допоміжне джерело водозабезпечення міста Покровськ. Необхідно збільшити депонування стоків, особливо у зимовий період. Для цього слід збільшити накопичувальну спроможність заглибленням міського ставка «Нульовка» та гряди розташованих нижче за течією. Приватним домогосподарствам доцільно створювати індивідуальні накопичувачі опадів.

- Динаміка річних обсягів поверхневих стічних вод вказує на необхідність удосконалення міської системи акумулювання дощової води, яка має забезпечувати збільшену на 35% від сучасної витрати стоків аномальних дощів і виключити небезпеку підтоплень територій.

- Застосування комбінованої системи акумулювання дощової води в глобальному плані не вирішить проблему дефіциту води у місті, водночас за рахунок збільшення уловлених та накопичених атмосферних опадів дозволить знизити навантаження на міську централізовану систему водопостачання у посушливі періоди року.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Carollo, M., Butera, I. & Revelli, R. (2022). Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale. *Public Library of Science (PLoS)*, №17(11), e0278107. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278107>
2. March, H., Hernández, M. & Saurí, D. (2015). Assessing domestic water use habits for more effective water awareness campaigns during drought periods: A case study in Alicante, eastern Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 963–972.
3. Ajayi, A.R. & Ugwu, C. C. (2008). Rainwater Harvesting for Agriculture and Domestic Supply in Enugu North Agricultural Zone, Nigeria. *Journal of Agricultural Extension*, 12(1). <https://doi.org/10.4314/jae.v12i1.47022>
4. Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M.J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L.N., Ghisi, E., Rahman, A. & Furumai, H. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Res.* 115, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
5. Villar-Navascués, R., Pérez-Morales, A. & Gil-Guirado, S. (2020). Assessment of Rainwater Harvesting Potential from Roof Catchments through Clustering Analysis. *Water*. 12(9), 2623. <https://doi.org/10.3390/w12092623>
6. Метеорологічний архів Pokrovsk. <https://www.meteoblue.com>
7. Методичні рекомендації із забезпечення ефективного відведення поверхневих вод. Наказ Мінжитлокомунгосп України 23.12.2010 № 470 (рекомендації в галузі житлово-комунального господарства) (Україна). <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0470738-10#Text>
8. Жук, В.М., Мальований, М.С., Мисак, І.В., Тимчук, І.С., Мушалла, Д. & Піхлер, М. (2021). Часова та просторова нерівномірність випадання дощів при моделюванні поверхневого стоку з урбанізованих територій. *Науковий вісник НЛТУ України*, 3(5), 67–73. <https://doi.org/10.36930/40310510>.
9. Kostenko, V., Zavialova, O., Chepak, O. & Pokalyuk, V. (2018). Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 12, 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>
10. Вовк, Л.І. & Трофимчук, Ю.А. (2018). Порівняння об'ємів поверхневого стоку з типових мікрорайонів житлової забудови великих міст, визначених згідно з нормативними документами України. *Вісник національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва*, №904, 3–9.
11. Правила користування системами централізованого комунального водопостачання та водовідведення в населених пунктах України. – К.: Мінжитлокомунгосп України, 2010. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0936-08#Text>
12. Arias, P.A., Bellouin, N. & Coppola, E. (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers. *Technical Summary*, 33–144.
13. Tavrel, M., Kostenko, V., Bohomaz, O., Kostenko, T., Zemlianskyi, O. & Pidhornyy, M. (2022). Recirculating Airlift for Aeration of Shallow Water Bodies. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(5), 177–187. <https://doi.org/10.12912/27197050/152114>
14. Kostenko, V., Tavrel, M., Bohomaz, O., Zavyalova, O., Kostenko, T., Myhalenko, K. & Kostyrka, O. (2022). Experimental Testing of Water Body Aeration Airlift Technology. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(3), 184–192. <https://doi.org/10.12912/27197050/147635>
15. Барабаш, О.Ю., Сич, З.Д. & Носко В.Л. (2008). Догляд за овочевими культурами. К. : Нововведення, 122 с.

Стаття надійшла до редакції 23.02.2023 і прийнята до друку після рецензування 12.06.2023

## REFERENCES

1. Carollo, M., Butera, I. & Revelli, R. (2022). Water savings and urban storm water management: Evaluation of the potentiality of rainwater harvesting systems from the building to the city scale. *Public Library of Science (PLoS)*, №17(11), e0278107. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278107>
2. March, H., Hernández, M. & Saurí, D. (2015). Assessing domestic water use habits for more effective water awareness campaigns during drought periods: A case study in Alicante, eastern Spain. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 15, 963–972.
3. Ajayi, A.R. & Ugwu, C. C. (2008). Rainwater Harvesting for Agriculture and Domestic Supply in Enugu North Agricultural Zone, Nigeria. *Journal of Agricultural Extension*, 12(1). <https://doi.org/10.4314/jae.v12i1.47022>
4. Campisano, A., Butler, D., Ward, S., Burns, M.J., Friedler, E., DeBusk, K., Fisher-Jeffes, L.N., Ghisi, E., Rahman, A. & Furumai, H. (2017). Urban rainwater harvesting systems: Research, implementation and future perspectives. *Water Res.* 115, 195–209. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.02.056>
5. Villar-Navascués, R., Pérez-Morales, A. & Gil-Guirado, S. (2020). Assessment of Rainwater Harvesting Potential from Roof Catchments through Clustering Analysis. *Water*. 12(9), 2623. <https://doi.org/10.3390/w12092623>.
6. Meteorological archive Pokrovsk. Retrieved from <https://www.meteoblue.com> [in Ukrainian].
7. Methodical recommendations for ensuring effective removal of surface water. Order of the Ministry of Housing and Communal Affairs of Ukraine dated 23.12.2010 No. 470. (recommendations in the field of housing and communal services). Retrieved 30.05.2023 from <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0470738-10#Text> [in Ukrainian].
8. Zhuk, V.M., Malyovany, M.S., Mysak, I.V., Tymchuk, I.S., Mushalla, D. & Pichler, M. (2021). Temporal and spatial unevenness of rainfall in modeling surface runoff from urbanized areas. *Scientific bulletin of NLTU of Ukraine*, 3(5), 67–73 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.36930/40310510>
9. Kostenko, V., Zavialova, O., Chepak, O. & Pokalyuk, V. (2018). Mitigating the adverse environmental impact resulting from closing down of mining enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, 12, 105–112. <https://doi.org/10.15407/mining12.03.105>
10. Vovk, L.I. & Trofymchuk, Yu.A. (2018). Comparison of the volumes of surface runoff from typical residential microdistricts of large cities, determined in accordance with regulatory documents of Ukraine. *Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Series: Theory and practice of construction*, №904, 3–9 [in Ukrainian].
11. Rules for using systems of centralized communal water supply and drainage in populated areas of Ukraine. (2010). K.: Ministry of Housing and Municipalities of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0936-08#Text> [in Ukrainian].
12. Arias, P.A., Bellouin, N. & Coppola, E. (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers. *Technical Summary*, 33–144.
13. Tavrel, M., Kostenko, V., Bohomaz, O., Kostenko, T., Zemlianskiy, O. & Pidhornyy, M. (2022). Recirculating Airlift for Aeration of Shallow Water Bodies. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(5), 177–187. <https://doi.org/10.12912/27197050/152114>
14. Kostenko, V., Tavrel, M., Bohomaz, O., Zavyalova, O., Kostenko, T., Myhalenko, K. & Kostyrka, O. (2022). Experimental Testing of Water Body Aeration Airlift Technology. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(3), 184–192. <https://doi.org/10.12912/27197050/147635>
15. Barabash, O.Yu., Sych, Z.D. & Nosko, V.L. (2008). Care of vegetable crops. Kyiv: Innovation [in Ukrainian].

*The article was received 23.02.2023 and was accepted after revision 12.06.2023*

**Богомаз Ольга Петрівна**

PhD, доцент кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Адреса робоча:** 43018, Україна, Волинська область, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8521-0394> **e-mail:** olha.bohomaz@donntu.edu.ua

**Костенко Віктор Климентович**

д.т.н., проф., завідувач кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Адреса робоча:** 43018, Україна, Волинська область, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8439-6564> **e-mail:** vk.kostenko@gmail.com

**Таврель Марина Ігорівна**

асистент кафедри природоохоронної діяльності ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Адреса робоча:** 43018, Україна, Волинська область, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7666-4554> **e-mail:** maryna.tavrel@donntu.edu.ua

**Главатських Кристина Максимівна**

студент ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

**Адреса робоча:** 43018, Україна, Волинська область, м. Луцьк, вул. Потебні, 56

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-9033-2764>

**e-mail:** krystyna.hlavatskykh.gf@donntu.edu.ua

УДК 330.341.1:624.14

**Kateryna Lavrukhina**, Candidate of Economic Sciences (PhD), Associate Professor of Construction Economics Department  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2417-7153> **e-mail:** [lavrukhina.ko@knuba.edu.ua](mailto:lavrukhina.ko@knuba.edu.ua)

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine

## **CLUSTERS IN INDUSTRIAL ECOSYSTEMS – NEW INNOVATIVE TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF POST-WAR UKRAINE**

**Abstract.** *The article discusses the importance of creating and developing clusters in the context of the digital economy and socio-ecological transformation. The main goal is to unite competencies and resources through common strategies and projects to increase the innovative potential of clusters and their participants. The article emphasizes the need to build and support industrial-technological partnerships worldwide as a key task for industrial clusters. The importance of developing the production sector and supporting one's own technological level for the development of the economy and ensuring national well-being, particularly in Ukraine, is also highlighted in the article.*

*Different ways and motives are proposed for strategic partnerships between clusters, including cooperation in management training, identification of international innovations, exploration of new markets, and initiation of international scientific research projects.*

*The need to create a professional management team of clusters was emphasized in times of digitalization, economic and socio-ecological transformation, as only clusters cover various areas of knowledge and will closely cooperate with other market participants. Moreover, increasing the innovation potential of clusters and their participants is becoming more and more important. This facilitates the pooling of competences and resources through joint strategies and joint projects. The importance of identifying structural gaps in industrial ecosystems to maximize the benefits of potential collaborations and promote innovative policies for upgrading business processes and equipment is considered. The geographical boundaries of the industrial ecosystem are determined by the interdependencies that connect organizations within its boundaries and new ties that strengthen beyond its boundaries. Industrial ecosystems are defined as multi-level production systems that include heterogeneous agents involved in value chains, as well as those who contribute to the realization of their potential and the country's productive capacity. The value chain can be divided into five main types of activities: inbound logistics, production, outbound logistics, marketing and sales, and after-sales services, and may also contain secondary or supporting activities that contribute to the effectiveness of the main activities. The article emphasizes that defining the real boundaries of industrial ecosystems is critical for governments interested in supporting them and transforming them into closed-loop innovation systems.*

**Keywords:** *cluster; innovation; industrial ecosystem; economy; partnership.*

К.О. Лаврухіна

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

## КЛАСТЕРИ В ПРОМИСЛОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ – НОВІ ІННОВАЦІЙНІ ТРЕНДИ РОЗВИТКУ ПОВОЄННОЇ УКРАЇНИ

***Анотація.** У статті розглядається важливість створення та розвитку кластерів у контексті цифрової економіки та соціально-екологічної трансформації. Основною метою є об'єднання компетенцій та ресурсів через спільні стратегії та проекти для збільшення інноваційного потенціалу кластерів та їх учасників. Стаття наголошує на необхідності побудови та підтримки промислово-технологічного партнерства по всьому світу як ключового завдання промислових кластерів. Також в статті звертається увага на важливість розвитку виробничого сектору та підтримки власного технологічного рівня для розвитку економіки та забезпечення національного добробуту, зокрема для України.*

*Запропоновано різні шляхи та мотиви для стратегічного партнерства між кластерами, включаючи співпрацю у навчанні на рівні управління, виявлення міжнародних інновацій, освоєння нових ринків та ініціювання міжнародних науково-дослідних проектів.*

*Наголошено про необхідність створення професійної управлінської команди кластерів саме у часи цифровізації, економічної та соціально-екологічної трансформації, оскільки лише кластери охоплюють різні сфери знань і тісно співпрацюватимуть з іншими учасниками ринку. Більш того, нарощення інноваційного потенціалу кластерів та їх учасників набуває все більшого значення. Це сприяє об'єднанню компетенцій і ресурсів через спільні стратегії та спільні проекти.*

*Розглянуто важливість виявлення структурних прогалів у промислових екосистемах для максимізації переваг потенційних співпраць та сприяння інноваційним політикам щодо оновлення бізнес-процесів та обладнання. Географічні межі промислової екосистеми визначаються взаємозалежностями, які пов'язують організації у її межах, та новими зв'язками, які зміцнюються поза її межами. Промислові екосистеми визначені як багаторівневі системи виробництва, що включають гетерогенних агентів, задіяних у ланцюгах створення вартості, а також тих, хто сприяє реалізації їх потенціалу та продуктивної потужності країни. Ланцюг створення вартості може бути розділений на п'ять основних типів діяльності: вхідну логістику, виробництво, вихідну логістику, маркетинг та продажі, та післяпродажні послуги, а також може містити вторинні або допоміжні діяльності, які сприяють ефективності основних діяльностей. Стаття підкреслює, що визначення реальних меж промислової екосистеми є критичним для урядів, які зацікавлені в їх підтримці та перетворенні на інноваційні системи з закритим циклом.*

***Ключові слова:** кластер; інновація; промислова екосистема; економіка; партнерство.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.62-73>

### Вступ

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематичні аспекти розвитку будівельної сфери в умовах війни досліджує зовсім незначна кількість науковців, зокрема це Ф. Горбонос, О. Коба, О. Процевят, Р. Скриньковський,



І. Удовенко, Ю. Тиркало, С. Цюх, М. Шемякін та інші. Наукові та практичні проблеми, пов'язані з формуванням кластерів будівельних підприємств та інноваційними процесами, відображені в роботах В. Аніна, Г. Рижаквої, В. Савчука, С. Смерічевської. У працях І. Новикової, Д. Пономаренка, А. Пересади, С. Шкарлета розглянуто пріоритетні напрямки підвищення ефективності інноваційного процесу в будівництві. Проблеми активізації інноваційної діяльності будівельної галузі розкриті в наукових працях таких вчених, як Андрієнко В.М., Биба В.В., Бондаренко Є.В., Бубенко О.П., Вознюк Ю.В., Волк О.М., Воробйов Ю.М., Глухова С.В., Гончарова Л.О., Куліков П.М., Мусієнко П.В., Новак О.В., Онищенко С.В., Різник Н.М., Рижаква Г.М., Тищенко О.М., Тютюник В., Хаустова В.Є., Шкарлет С.М., Юр'єва С.Ю. У даних публікаціях увага авторів концентрується на дослідженні окремих напрямків організації інноваційної діяльності будівельних підприємств та її ресурсного забезпечення, не розглядаючи при цьому в комплексі економічні, соціальні та екологічні процеси досягнення збалансованого, сталого розвитку [1].

**Мета і завдання.** Глибокі структурні перетворення в українському промисловому та технологічному ландшафтах, спричинені агресивною насильницькою деіндустріалізацією внаслідок повномасштабного вторгнення росії на територію України, змінили не лише характер та спосіб реалізації наявних факторів виробництва, але й актуалізували пришвидшену інтеграцію українських підприємств в глобальні виробничо-збутові мережі та розширили торговельні взаємозв'язки в умовах глобального технологічного й цифрового суперництва. Саме такі процеси пришвидшили розвиток інноваційних технологій і утворення нових кластерів в концепції промислових районів. Метою даного дослідження є: аналіз і розвиток кластерів у контексті цифрової економіки промислових екосистем; дослідження і висвітлення процесу колабораційного об'єднання компетенцій та ресурсів через спільні стратегії та проекти для збільшення інноваційного потенціалу кластерів та їх учасників. Основні завдання полягають у консолідації всіх можливостей для найскорішого відновлення країни.

## Основні результати досліджень

Процеси побудови та підтримки промислово-технологічного партнерства по всьому світу стають ключовим завданням промислових кластерів сьогодення.

Існують різні шляхи та мотиви для стратегічного партнерства.

Наприклад:

- ✓ Співпраця між кластерами для спільного навчання на рівні управління (наприклад, розвиток навичок для менеджерів кластерів, технологічні тренди, найкращі практики кластерних сервісів тощо).
- ✓ Виявлення «гарячих точок» міжнародних інновацій та наближення технологічних лідерів для потенційної співпраці.
- ✓ Освоєння нових міжнародних ринків, актуальних для учасників кластеру.
- ✓ Ініціювання або підтримка транскордонних партнерств на рівні B2B щодо комерційної діяльності.
- ✓ Ініціювання міжнародних спільних науково-дослідних проектів серед учасників кластеру.

Важливою ознакою сьогодення є стрімке збільшення цифрових розривів, що створюють небезпеку дедалі більшого відставання країн, що розвиваються. І це в першу чергу стосується України. Для будь-якої країни виробничий сектор і підтримка власного технологічного рівня є стратегічно важливим національним завданням для розвитку економіки, сфери послуг і забезпечення зростання доходів і національного добробуту. Саме сьогодні цілком слушною є теза про те, що “будь-яка нація або група націй, яка не має розвинутого виробничого сектору, буде на милості у більш компетентних країн. Будь-яке населення, багате або бідне, потребує сильної виробничої бази, для того щоб процвітати в економіці та захищати себе політично” [2].

Нові поняття входять в життя українського бізнесу і дуже часто стають модним словом чи виразом, про яке швидко забувають, оскільки попри витрати бізнесових, адміністративних і донорських ресурсів вони не приносять успіху. Бізнесу важливо розуміти, в чому перевага того чи іншого механізму розвитку і чим вони відрізняються один від одного, щоб швидше досягати успіху. Поширення знань та інновацій в процесі діалогу та тісного співробітництва між компаніями і встановлення між ними постійних зв'язків значно підвищує успішність регіональних промислових систем.

Серед таких механізмів мають місце:

1. кластери, в яких домінують кілька споріднених галузей, або об'єднання малих та середніх підприємств;
2. райони-сателіти, або промислові райони.

Галузевий кластер є ширшим від поняття «галузь/сектор економіки» і від промислового району, оскільки він представляє собою не лише компанії одного сектора, а весь ланцюжок створення вартості у межах визначеної галузі – від постачальників сировини до кінцевої продукції, включаючи всі допоміжні послуги та спеціалізовану інфраструктуру.

Кластери – набагато ширше поняття, що охоплює значно більшу кількість і спрямування діяльності підприємств і установ. Доречно розглянути авторське визначення поняття «кластер» – це сконцентрована за певною ознакою на певній території група взаємопов'язаних організацій, які доповнюють один одного, формують унікальні компетенції та дифузії знань і умінь, таким чином збільшуючи конкурентоздатність окремих компаній і кластера в цілому [3].

Кластери визначаються як локальна просторова економічна агломерація з числа компаній, постачальників компонентів, постачальників послуг та інших фірм у певній галузі, пов'язаних зовнішніми факторами та взаємодоповнюваністю різних типів. Кластерне об'єднання повинно включати також організації, що є «інститутами співробітництва» (IFC, Institutions for Collaboration): торгові асоціації; торгові палати; мережі підприємців та роботодавців; агенції зі стандартизації; центри якості; технологічні мережі та інші.

Концепція кластерів та концепція промислових районів мають спільні характеристики, зокрема вони наголошують на тому, що агломерація (сукупність в одному місці) пов'язаних видів економічної діяльності та типи взаємодії між ними покращують економічні показники як кластера чи промислового району, так і кожного з учасників. І хоча терміни «кластер» і «промисловий район» іноді використовуються майже як синоніми, ці дві концепції не збігаються. Важливо розуміти розбіжності у концепціях, щоб правильно їх застосовувати. Відсутність ясності в тому, що відрізняє ці два

підходи, іноді створює непотрібну плутанину, особливо серед практиків. Промислові райони характеризуються групами спільно розташованих малих та середніх підприємств, які працюють у певній галузі. У межах регіону (промислового району) є чимало великих компаній, які формують спеціалізацію регіональної економіки. Промисловий район передбачає агломерацію невеликих компаній, що працюють у певному діапазоні галузей.

Оскільки кластери охоплюють ту ж конфігурацію підприємств, що й у промислових районах, промислові райони виступають одним із найпростіших типів кластерів. Однак поширеними є конфігурації кластерів, у яких кілька великих компаній співіснують з великою кількістю малих і середніх у певній галузі, але учасниками кластеру є і фірми, які виходять за визначені географічні межі. Промислові райони досягають економічної ефективності насамперед за рахунок місцевого аутсорсингу та гнучкості їх виробничих механізмів, які багато в чому завдячують саме розташуванню та соціальним зв'язкам. А от у кластерів взаємозв'язок між існуючою структурою економічної діяльності у регіоні, де розвиваються кластери, та економічними показниками інший, адже в цих утвореннях виникають значно більші агломераційні ефекти. Такі ефекти проявляються не тільки у вигляді концентрації виробників кінцевих товарів та послуг і у зростанні реального доходу працівників та споживачів. В кластерах значно сильнішою є можливість спільного використання локальних об'єктів, послуг, постачальників сировини та проміжних товарів, трудових ресурсів. На цих можливостях власне і концентрується кластер, адже вони призводять до скорочення трансакційних витрат за допомогою широкої пропозиції з боку постачальників проміжних товарів. Кластери можуть знижувати не лише вартість виробництва, але і вартість обміну за рахунок покращення торговельних відносин і прозорості місцевих ринків ресурсів і продукції.

Агломерація в кластері, на відміну від простого промислового району, виникає не тільки внаслідок спеціалізації регіону у конкретній галузі і відповідного використання компаніями спільних ресурсів (так звана «економія за рахунок локалізації»). Важливим є спільне використання знань, це є ціллю існування кластера. Вплив вторинних ефектів місцевих знань не використовується ізольовано якоюсь окремо взятою фірмою, місцеві наукові і технологічні відкриття одночасно розширюють базу знань кількох місцевих фірм. Цьому, звісно, сприяють місцеві навчальні заклади. Політика, що застосовується регіональною владою, стає ефективною, якщо максимально використовує в кластерах переваги співпраці освітніх закладів з бізнесом, зосереджуючи свої зусилля на цьому. Вона розвиває існуючі кластери або сприяє створенню нових [4].

Технологічні зміни, роботизація та цифровізація невпинно призводять до мутації традиційних секторів як на рівні організаційних моделей, так і на рівні урядової політики, яка має вчасно реагувати на особливості нового міжнародного поділу праці. Виникає феномен конкуперації, коли при створенні спільної вартості в процесі співпраці (кооперації) не виключається перебування фірм у відносинах конкуренції. Більше того, закриття ринків під час пандемічних обмежень актуалізувало запит на дублювання в ланцюжках постачання, навіть якщо воно передбачає співпрацю з конкурентом. Прикметно, що кордони або так звані демаркаційні лінії галузей розвиваються внаслідок глобальних процесів вертикальної дезінтеграції та промислової

реорганізації, тоді як між виробництвом та послугами встановлюються нові симбіотичні (взаємодоповнюючі та взаємовигідні) відносини.

У багатьох країнах влада сприяє створенню кластерів, спеціальних економічних зон чи індустріальних парків. До них належать супутні бізнес-послуги, які пропонуються учасниками кластеру координуючою організацією, такою як кластер управління або управління парком.

Такі кластерні ініціативи є організованими мережами між великою кількістю різних учасників в регіональній економічній системі.

Усі кластери мають чотири спільні кваліфікаційні характеристики:

- ✓ просторовий фокус;
- ✓ галузева спрямованість;
- ✓ критична маса фірм;
- ✓ одиниця управління.

Хоча кластери включають ці характеристики, їх реалізація може приймати різні форми, зображені на рис. 1.



Рис. 1. Форми кластерної реалізації [5]

Роль кластерів у регіональному економічному розвитку – це професійні та добре функціонуючі кластери, які представляють собою критичну масу компетенцій, ринкових знань та бізнес-інтелекту в певних промислових або технологічних галузях. Кластери можуть служити ідеальними інструментами для реалізації пріоритетів та відкривати нові шляхи для майбутньої орієнтованої трансформації регіональних економічних та інноваційних систем, як на стратегічному, так і на оперативному рівні. Професійні організації кластерів сприяють налагодженню близьких відносин з учасниками кластера, що дає можливість отримувати ринкову інформацію та постійно адаптуватися до нових умов.

Однак, хоча кластери не є єдиними представниками інновацій в регіоні, вони можуть бути відповідним інструментом для підтримки регіональних інноваційних та економічних політик. Тому вони можуть відігравати активну роль на всіх етапах регіонального розвитку інноваційної екосистеми.

Щодо регіональних інноваційних або економічних стратегій, існує багато потенційних ключових гравців. Наступне зображення показує, що кластери можуть стати ключовими драйверами розвитку та впровадження стратегій завдяки вбудованій компетентності та ринковій інформації (рис. 2).



Рис. 2. Становлення кластерів є невід'ємною частиною інноваційної екосистеми [5]

Зазначимо, що індустріальна зона або парк можуть перетворитися на еко-індустріальний парк за рахунок поєднання наступних факторів:

- ✓ екологічні та інженерні системи;
- ✓ правильне зонування та планування;
- ✓ екологічний менеджмент діяльності парку.

За рахунок цього підсилюється ефективність на рівні підприємства (у результаті мінімізується утворення відходів та викидів від окремих підприємств); колективна синергія призводить до оптимізованого обміну ресурсами між компаніями.

Кінцева мета полягає в тому, щоб звести майже до нуля утворення відходів, стічних вод та викидів. За підходом ЮНІДО, термін «еко-індустріальний парк» став загальним терміном для парків, що реалізують колективні екологічні ініціативи при проектуванні, будівництві та/або поточній експлуатації та управлінні.

Водночас існують й альтернативні назви еко-індустріальних парків, таких як:

- ✓ стала економічна зона;
- ✓ низькокарбонова технологічна зона;
- ✓ зелений інвестиційний кластер;
- ✓ циркулярний виробничий парк.

Еко-індустріальні парки сприяють реалізації «Цілей сталого розвитку 2030» (ЦСР) (рис. 3).



Рис. 3. Цілі сталого розвитку в Україні [6]

ЦСР включають цілі та дії для промисловості, інновацій та інфраструктури, а також заходи щодо забезпечення гідної праці, економічного зростання, гендерної рівності та дій щодо боротьби зі зміною клімату. Наприклад, ЦСР 9 спрямована на значне збільшення вкладу промисловості у зайнятість та валовий внутрішній продукт до 2030 року. Досягнення цієї мети може бути реалізоване за рахунок модернізації галузей, щоб зробити їх стійкими, підвищення ефективності використання ресурсів та впровадження чистих та екологічно безпечних технологій та промислових процесів. Метою ЦСР 7, серед іншого, є подвоєння темпів підвищення енергоефективності та значне збільшення частки відновлюваних джерел енергії до 2030 року. Метою ЦСР 8 є забезпечення сталого економічного зростання на душу населення, ЦСР 13 зосереджена на діях боротьби зі зміною клімату, а ЦСР 5 стосується питань гендерної рівності. ЦСР 12 спрямована на суттєве скорочення утворення відходів за рахунок запобігання, скорочення, переробки та повторного використання у державному та приватному секторах до 2030 року. Це також вимагатиме від фірм, особливо великих та багатонаціональних підприємств, застосовувати стійкі методи та відповідним чином звітувати про показники сталого розвитку.

Промислові екосистеми є складними системами, котрим притаманна ієрархічність і подільність. Ієрархія при цьому не обов'язково передбачає відносини підпорядкування, натомість вона означає, що промислові екосистеми є багаторівневою системною структурою, що характеризується взаємопереплетенням вертикальних і горизонтальних відносин, адже одні й ті ж самі організації можуть бути вбудовані в численні структури, між собою не пов'язані. Фірми при цьому можуть працювати в одному або кількох традиційно визначених секторах у різних ланцюгах створення вартості та виконувати різні виробничі та/або технологічні функції в кожному з них.

Принцип подільності передбачає, що хоча всі гравці в промислових екосистемах так чи інакше взаємодіють і, таким чином, взаємозалежні, деякі гравці більш залежні, ніж інші: у межах багаторівневої складноієрархічної промислової екосистеми кожна компанія-виробник, проміжний учасник, а також суб'єкт попиту вбудовані в мережу структурних взаємозалежностей, які водночас визначають, обмежують або уможливають ту чи іншу їхню поведінку. Це означає, що їхні місце, роль та способи створення вартості не просто залежать від особливостей технологічного процесу, але, що важливіше, вони «індуковані» та «спровоковані» структурою екосистеми, в яку вони вбудовані на принципах взаємозалежності [7].

Суб'єкти ринку з боку попиту відіграють вирішальну роль у формуванні промислової екосистеми: зміни обсягів попиту (як кінцевого, так і проміжного), а також структури та якості попиту (в результаті змін у розподілі доходів) задають (збільшують чи обмежують) виробничі можливості для фірм в екосистемі. Саме з боку попиту формується запит на обсяг ринку, особливо проміжний попит на компоненти, який, в свою чергу, впливає на спеціалізацію, подальший поділ праці та збільшення віддачі. В результаті структурних взаємозалежностей, що пов'язують організації на боці пропозиції та попиту в промисловій екосистемі, кожна з них (і навіть ті, що перебувають у відносинах конкуренції) буде залучена до окремих процесів створення спільної вартості.

Географічні межі промислової екосистеми визначаються взаємозалежностями, що зв'язують організації всередині екосистеми, і новими зв'язками, що зміцнюються за її межами. Виявлення структурних прогалів у екосистемі стає вкрай важливим, адже слід максимально використовувати вигоди від потенційної співпраці і особливо тоді, коли фірми, які спеціалізуються на зрілих, а не «дитячих» (що перебувають на початку розвитку) промислових секторах, потребують інноваційної політики оновлення як бізнес-процесів, так і обладнання. Визначення реальних меж екосистеми стає критично важливим для урядів, зацікавлених у підтримці промислових екосистем та їх перетворенні в замкнуті (повні) цикли інновацій. Відтак промислові екосистеми можна визначити як багаторівневі виробничі системи, що включають різнорідних агентів, задіяних у галузевих ланцюжках створення вартості та таких, що вносять свій внесок у реалізацію потенціалу екосистеми (та її учасників) та продуктивної спроможності країни [8].

Ланцюг створення вартості можна розбити на п'ять основних видів діяльності:

1. вхідна логістика (наприклад, отримання сировини, складування та управління запасами);
2. операції (всі види діяльності у процесі перетворення сировини на готову продукцію або послуги);
3. вихідна логістика (наприклад, доставка кінцевого продукту або послуги кінцевому користувачеві);
4. маркетинг та продажі (всі стратегії та заходи, спрямовані на спонукання потенційних клієнтів до купівлі кінцевого продукту чи послуги, включаючи вибір каналів збуту, рекламу та ціноутворення);
5. післяпродажні послуги (всі види діяльності, спрямовані на покращення споживчого досвіду, такі як обслуговування клієнтів, ремонт чи технічне обслуговування).

Ланцюг створення вартості також може включати вторинні або допоміжні види діяльності, які сприяють підвищенню ефективності основних видів діяльності, таких як закупівля, технологічні дослідження, розробка продуктів, управління людськими ресурсами та побудова корпоративної інфраструктури. Ці види діяльності формують ланцюг створення вартості фірми, кожна з яких створює і додає цінність на кожному етапі до кінцевого продукту або послуги, саме тому фірма налаштована на збільшення частки своєї присутності у ланцюгу створення вартості, щоб розвивати та підтримувати конкурентну перевагу.

Концепція глобальних ланцюгів створення вартості базується на явищі глобальної фрагментації виробництва, що зростає, адже бізнес-функції та виробнича діяльність у ланцюжку створення вартості все частіше виконуються різними організаціями у різних країнах.

Промислова екосистема, таким чином, являє собою структурований виробничий простір, зосереджений здебільшого на його виробничих організаціях, а також на інших суб'єктах (в тому числі державних), посередниках та суб'єктах з боку попиту, цілеспрямовано залучених у процеси підвищення складності економічної структури країни механізмами диверсифікації та інноваційного промислового оновлення [9]. Кожен вид виробничої діяльності, в якому використовуються обладнання, процеси, навички та сировина, що доповнюють один одного і тісно пов'язані в процесах

виробництва, описується поняттям «виробнича база» або «технологічна база» фірми, незалежно від кількості або виду продукції, що випускається. Фірма може мати кілька таких баз, а перехід на нову базу вимагає від фірми досягнення компетентності в якомусь новому технологічному процесі, що істотно відрізняється від того, що вже був опанований. Крім того, промислові екосистеми можуть утворювати нові організаційні простори, базовані на засадах географічної близькості, уможливлення руху сумісних матеріальних потоків та скоординованому управлінні ресурсами, а не на галузевій класифікації.

**Пропозиції до обговорення.** Важливо наголосити, що процес колаборації кластерів у контексті цифрової економіки та соціально-екологічної трансформації є важливим кроком до злагодженої роботи всіх гілок влади та бізнесу, що направлений на участь в розробці стратегії відновлення України. Стаття наголошує на необхідності розвитку промислово-технологічного партнерства для промислових кластерів та підтримки власного технологічного рівня для розвитку економіки та забезпечення національного добробуту. Звертається увага на важливість виявлення структурних прогалин у промислових екосистемах для максимізації переваг співпраці та інноваційних політик щодо оновлення бізнес-процесів та обладнання. Пропонуються різні шляхи та мотиви для стратегічного партнерства між кластерами, включаючи співпрацю у навчанні на рівні управління, виявлення міжнародних інновацій, освоєння нових ринків та ініціювання міжнародних науково-дослідних проєктів.

## **Висновки**

Вищезазначені тенденції прискорюють процеси змін та збільшують виклики для компаній щодо модернізації та диверсифікації свого бізнесу для майбутньої конкурентоспроможності повоєнної економіки країни. Кластери за своєю природою ідеально підходять для підтримки зв'язування компетенцій та/або потужностей підприємств-членів. Однак, керівництву кластера потрібно взяти на себе нову роль. Вони повинні бути добре інформовані про специфічні потреби членів. В той же час, вони також повинні бути ознайомлені з відповідними тенденціями та потенційними майбутніми розвитками щодо технологій, ланцюгів створення вартості та потреб ринку, пов'язаних з кластером. Антиципація та передбачення стають ключовими факторами та необхідною частиною моніторингу. Насправді, організація кластера повинна регулярно збагачуватись новими знаннями та мати можливість інтегрувати їх у сервісні діяльності для учасників кластера. Нові діяльності кластера, де керівництво кластера та учасники кластера разом картографують майбутні тенденції та виклики, стають все більш актуальними. Ця інноваційна роль кластерів та пов'язані з нею вимоги і завдання будуть продовжуватись та навіть прискорюватись у найближчі роки, що і слугуватиме підґрунтям для подальшого аналізу та оцінки діяльності інноваційного інструментарію при відбудові країни.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новиков Д.М., Лаврухіна К.О., Кушик-Стрельніков Я.В. (2020). Інноваційні технології в будівництві. Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин, 44, 126–132.
2. Rynn J. Why Manufacturing Matters: A production-centered path to economic growth, 2000 URL: [https://economicreconstruction.org/sites/economicreconstruction.com/static/SeymourMelman/archive/de\\_re/ProductionCenteredEconomics.pdf](https://economicreconstruction.org/sites/economicreconstruction.com/static/SeymourMelman/archive/de_re/ProductionCenteredEconomics.pdf) (дата звернення 10.03.2023).
3. Лаврухіна К.О. (2020). Організаційно-економічний механізм формування кластерів будівельних підприємств в інноваційному середовищі: дис. кандидата екон.наук.: 08.00.04. Київ, 335.
4. I. Kalina, D. Novykov, V. Leszczynski, K. Lavrukhina, P. Kukhta, V. Nitsenko (2022). Entrepreneurial structures of the extractive industry: foreign experience in environmental protection. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 136–141. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/136>
5. Cluster Development Guide URL: <https://www.giz.de/en/downloads/giz2021-en-cluster-development-guide.pdf> (дата звернення 25.03.2023).
6. Як ООН підтримує Цілі сталого розвитку в Україні URL: <https://ukraine.un.org/uk/sdgs> (дата звернення 20.03.2023).
7. Посібник з використання інструментарію екоіндустріальних парків ЮНІДО URL: [https://hub.unido.org/sites/default/files/publications/EIP%20Toolbox%20Manual-en\\_gb-uk\\_ua-C.pdf](https://hub.unido.org/sites/default/files/publications/EIP%20Toolbox%20Manual-en_gb-uk_ua-C.pdf) (дата звернення 26.03.2023).
8. Андрєєва Н., Тютюнник Г. (2021). Інституційне та інвестиційно-інноваційне забезпечення екологічно безпечного землекористування в Україні: детермінанти сталого розвитку. *Ефективна економіка*, 10. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.10.3>
9. Шкарлет С.М., Подимова Л.А. (2011). Особливості функціонування та розвитку технопарків в Україні. *Проблеми підвищення ефективності інфраструктури*, 23, 184–193.

*Стаття надійшла до редакції 10.03.2023 і прийнята до друку після рецензування 03.07.2023*

## REFERENCES

1. Novykov, D., Lavrukhina, K., & Kushyk-Strelnikov, Ya. (2020). Innovatsiini tekhnolohii v budivnytstvi. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 44, 126–132 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2707-501x.2020.44.126-132>
2. Rynn, J. (2000). Why Manufacturing Matters: A production-centered path to economic growth. Retrieved 10 March 2023 from: [https://economicreconstruction.org/sites/economicreconstruction.com/static/SeymourMelman/archive/de\\_re/ProductionCenteredEconomics.pdf](https://economicreconstruction.org/sites/economicreconstruction.com/static/SeymourMelman/archive/de_re/ProductionCenteredEconomics.pdf)
3. Lavrukhina, K.O. (2020). Organizacijno-ekonomichnij mehanizm formuvannja klasteriv budivel'nih pidpriemstv v innovacijnomu sere dovishhi: dis. kandidata ekon.nauk.: 08.00.04. Kyiv, 335 [in Ukrainian].
4. Kalina, I., Novykov, D., Leszczynski, V., Lavrukhina, K., Kukhta, P., & Nitsenko, V. (2022). Entrepreneurial structures of the extractive industry: foreign experience in environmental protection. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 136–141. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/136>
5. Cluster Development Guide. Retrieved 25 March 2023 from: <https://www.giz.de/en/downloads/giz2021-en-cluster-development-guide.pdf>

6. Jak OON pidtrimue Cili stalogo rozvitku v Ukraini. Retrieved 20 March 2023 from: <https://ukraine.un.org/uk/sdgs>
7. Posibnik z vikoristannja instrumentariju ekoindustrial'nih parkiv JuNIDO. Retrieved 26 March 2023 from: [https://hub.unido.org/sites/default/files/publications/EIP%20Toolbox%20Manual-en\\_gb-uk\\_ua-C.pdf](https://hub.unido.org/sites/default/files/publications/EIP%20Toolbox%20Manual-en_gb-uk_ua-C.pdf)
8. Andreeva, N., & Tjutjunnik, G. (2021). Institucijne ta investicijno-innovacijne zabezpechennja ekologichno bezpechnogo zemlekoristuvannja v Ukraini: determinanti stalogo rozvitku. *Efektivna ekonomika*, 10 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2021.10.3>
9. Shkarlet, S.M., & Podymova, L.A. (2011). Osoblyvosti funkcionuvannia ta rozvytku tekhnoparkiv v Ukraini. *Problemy pidvyshchennia efektyvnosti infrastruktury*, 23, 184–193 [in Ukrainian].

*The article was received 10.03.2023 and was accepted after revision 03.07.2023*

**Лаврухіна Катерина Олександрівна**

кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки будівництва, Київський національний університет будівництва і архітектури

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0003-2417-7153> **e-mail:** lavrukhina.ko@knuba.edu.ua

UOT: 628.31.631.85

**V.I. Jafarov**

**e-mail:** vcdiv@rambler.ru

Ministry of Science and Education Republic of Azerbaijan Institute of Soil Science and Agrochemistry, Baku, Azerbaijan Republic

## **THE EFFECT OF USING OF ORGANIC AND MINERAL ORIGIN RAW MATERIALS IN AGRICULTURE ON SOIL FERTILITY**

**Summary.** *The presented work relates to ecology, chemical technology, in particular, methods for the production of fertilizers from sewage sludge and agriculture.*

*The scale of production activity increases with population growth, so the problem of optimizing the interaction between man and nature is relevant and its solution is of great importance in improving the environment. Wastewater is one of the by-products of anthropogenic activities. When it is cleaned, a precipitate (sludge) is formed. The volume and the toxicity of sludge are, of course, increasing due to urban growth and the intensification of industrial production. About 25-30 kg of dry sediment is formed per person per year in European countries.*

*There is no single rational and environmentally safe, currently tested technology for sludge disposal in our republic, and its appearance is unlikely to be created shortly since the sediments of different treatment facilities have different physicochemical and biological properties, as well as entirely different qualitative and quantitative compositions of elements.*

*Purifying and disposing of such waste (sludge) is a serious environmental problem. The main principles of its solution are a set of environmental and economic interests of society, environmentally safe disposal and use of sludge, and their involvement in the economic cycle. The problem of using waste for fertilizer has various aspects and it is inseparable from the problem of soil fertility and ecology.*

*The exceptional importance of organic matter in increasing soil fertility has long been known. In this regard, application of organic-mineral complexes that affect the productivity and quality of plants, determination of effective fertilizer norms and application of new technologies are an urgent issue and are of great theoretical and practical importance.*

*The fertility of the soil is very dependent on the intensity of the biological processes taking place in it. Sufficient moisture, organic matter and a favorable reaction of the soil solution are required for the activity of microorganisms in the soil.*

*He worked on the technology of organic-mineral complex preparation and applied it under agricultural plants (cotton) in order to achieve the set goal in the direction of solving this issue.*

**Key words:** *Soil; cotton; organic-mineral complex; fertilizer; fertility.*

**<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.74-80>**

### **Introduction**

Cotton farms buy thousands of tons of mineral fertilizers, herbicides and other substances every year in order to achieve high yields. At the same time, the state and municipalities spend a large amount of money on land reclamation.

Application of scientific achievements and advanced practices to production will allow to achieve positive results in the development of cotton farming [4].

In this regard, using of alternative possibilities (volcanic mud, igneous shale, domestic and sewage waste, etc.) raw materials for the preparation of organic-mineral complexes based on modern technology has become a priority issue today [2].

Natural minerals of non-ore origin, widely distributed in our republic, wastes of various purposes, etc. the expansion of the potassium-phosphorus-nitrogen fertilizer raw material base, including the fertilization of low-fertile soils and the improvement of the ecological environment, is the main goal of the research.

### **Object and methods of the research**

Field researches were carried out in the territory of Azadkend municipality, Saatli region, in 5 variants and 4 replicates, and the area of each plot was 100 m<sup>2</sup>. BO-440 white golden cotton variety was used in field experiments.

Ammonium salt (33.4%), phosphorus-amaphos (51%), potassium-potassium sulfate (52%) and organic-mineral complexes were applied as nitrogen fertilizers.

Soil agrochemical analysis in soil samples taken, pH in potentiometer, granulometric composition – N.A. Kachinski, absorbed ammonia (N-NH<sub>4</sub>) – D.P. Konev, nitrate nitrogen (N-NO<sub>3</sub>) – Grandval-Lyaju, total humus – I.V. Tyurin, total nitrogen, total phosphorus – K.E. Ginzburg and G.M. Sheglova, free phosphorus – M.P. Machigin, total potassium – P.K. Smith, exchangeable potassium – P.V. Protosov was determined in a flame photometer with water.

The agrotechnical care of the plants was carried out in accordance with the agrotechnical rules adopted for the region.

### **Analysis and discussion**

Chemicalization was the basis of agricultural intensification all over the world in the second half of the last century. As a result of this, a high yield was obtained, but later this process created great problems from an environmental point of view.

In this regard, using of organic fertilizers in the production of agricultural products has become one of the priority issues.

P.B. Zamanov pointed out that there are up to 40 different wastes that can be used as organic fertilizers and that have a reserve of 22 million tons and showed that these wastes are collected in different places every year and cause environmental pollution [3, 14, 15].

Preparation and application of such waste as organic fertilizer is very favorable for farms both economically and ecologically.

It has been determined by the conducted researches that various local organic wastes can be used as organic fertilizers. These organic wastes increase the nutrients in the soil and have a positive effect on the productivity of agricultural plants [11, 12].

By carrying out laboratory research (chemical, radioactive, microbiological, etc.) of minerals with a rich organic-chemical composition, as well as domestic and industrial wastes, which are available in our country, the complex fertilizer preparation technology is applied in the relevant farms, and at this time, the hydro-physical properties of the soil, at the same time, it is very important to solve applied science-based issues, such as determining the effect on the nutritional regime, development, and productivity of plants [7, 9].

Tillage methods have a great role in the cultivation of agricultural products, as well as in increasing efficiency in farming. It is clear from scientific studies and experiments that minimizing the main cultivation of the soil has positive results [1, 10].

In order for cultivated plants to grow and develop normally and produce high yields, they must be well provided with the life factors (water, light, air, food). Of these life factors, water and food are mainly paid for by land. Therefore, improving the water-physical properties of the soil is one of the important issues.

The fact that the soil structure in the planting layer has a favorable structure for the plant, preservation of moisture in the soil, and at the same time improves the exchange of nutrients, which is considered one of the main factors that directly affect productivity.

In the areas of our republic where irrigated agriculture is spread, soil degradation, decrease in fertility, and deterioration of water physical properties of soils have taken a more intensive form [5, 13].

It is necessary to improve the physical-mechanical and agrochemical indicators of those soils, and at the same time to regulate the humus balance in order to get a planned high yield from agricultural plants.

Application of organic fertilizers is important for improving soil structure and increasing fertility (figure 1).

It is clear from the conducted multi-year researches that a part of the mineral fertilizers given to the soil is exchanged or is washed into the deep layers of the soil in the form of various compounds. This process varies depending on soil and climate conditions [6, 8].

In order to study leaching losses when fertilizers are applied, lysimeter pots (50x50 cm) were placed under the cotton plant in the 0-60 cm layer of meadow-grey soil in the research area, and samples of water filtered from the lysimeters were taken and analyzed in the characteristic development phases.

Table 1. Nutrient leaching under the cotton plant in meadow-grey soils, mg/l

<b>Water content</b>	<b>Control variant</b>	<b>NPK</b>	<b>Organic-mineral complex</b>
Roughness	42,86	37,24	41,81
pH	7,4	7,5	7,6
Sodium Na <sup>+</sup>	293,56	371,30	174,53
Potassium K <sup>+</sup>	24,16	157,45	34,41
Calcium Ca <sup>2+</sup>	731,59	239,67	659,51
Magnesium Mg <sup>2+</sup>	75,44	303,19	106,08
Iron Fe <sup>3+</sup>	2,91	305,50	66,34
Sulfate SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1299,70	191,76	182,28
Carbonate CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1388,01	681,48	1312,85
Chloride Cl <sup>-</sup>	299,71	606,30	119,66
Silicon Si	3,01	1504,01	307,52
Aluminum Al	1,97	370,83	79,67
Dry residue	4100	4700	3100



Figure 1 (a-d). Examples of the use of raw materials of organo-mineral origin in agriculture

The experimental soils were poorly supplied with nutrients in forms assimilated by plants.

PH in filtered water samples is close to neutral as can be seen from the table (Table 1). It ranges from 7,5 to 7,6. The amount of leached chlorine (Cl) and sulfate ions did not exceed the permissible limit.

In recent years, the cultivation of cotton as a monoculture in our republic, the non-application of crop rotation, the one-sided application of mineral fertilizers, the use of organic fertilizers in very small quantities, and the violation of the hydro-physical and biological properties of the soil have led to a decrease in their natural fertility in various degrees.

M.P. Babayev, E.A. Gurbanov and others have shown that long-term irrigation, recultivation cultivation along with the application of organic fertilizers improves the structure of grassland and grassland wetlands in Central Asian conditions [2, 5].

It is clear from the above that the application of organic fertilizers together with mineral fertilizers plays an important role in obtaining a high and stable yield from agricultural crops.

Studying of the agro-chemical and granulometric composition of the soils where agricultural plants are grown allows determining the agronomic and economic efficiency of the fertilizers applied to these soils.

In this regard, some granulometric composition of the irrigated sandy loam soils of the experimental area was also studied (Table 2).

Table 2. Granulometric composition of experiment field irrigated meadow-grey soils, %

Variants	Depth cm	Size of fractions, mm						
		1,0-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	< 0,001	< 0,01
Control	0-50	0,27	17,33	15,20	4,32	24,68	38,20	67,20
Sand	0-50	-	18,08	16,12	6,36	26,60	32,84	65,80
Organic-mineral complex	0-50	0,28	18,48	22,20	3,88	22,56	32,60	59,04

As can be seen from the results of the analysis, the sub-crop layers of the irrigated loam-gray soils ( $AU^I_a + AU^{II} = 0.50$  cm) had a medium clay granulometric composition, and the granulometric composition was relatively lighter (< 0,59%) in the organic-mineral complex has been done.

### Result

1. The researched meadow-grey soils are medium granular soils. Application of organic and mineral complex in this type of soil affects the soil structure to a certain extent and improves its capacity, as a result of which the root system of the plant develops better and can absorb nutrients better.

2. During the research, while analyzing the water samples filtered from the lysimeters placed under the cotton plant in the irrigated meadow-grey soils, it was found that pH is close to neutral. It ranges from 7.5 to 7.6. The amount of leached chlorine (Cl) and sulfate ions did not exceed the permissible limit.

3. As can be seen from the results of the analysis, the sub-crop layers of irrigated loamy-gray soils ( $AU^I_a + AU^{II} = 0.50$  cm) had a medium clay granulometric content, and the granulometric content was relatively lighter (< 0,59%) in the organic-mineral complex was observed.

### REFERENCES

1. Babayev, A.H., & Osmanova, S.A. (2016). Effect of soil cultivation and fertilizers on the degree of soil fragmentation under irrigation conditions. *Agrarian science of Azerbaijan*, 5, 20-31.
2. Alosmanov, M.S., Aliyev, A.A., Mammadov, M.I., Jabbarova, Z.A., Jafarov, V.I., Abbasov, O.R., Baloglanov, E.E., Alosmanova, V.M., Yolchuyeva, U.C., & Gafarova, O.O. (2022). Effect of organic-mineral complexes prepared on the basis of local raw materials and wastes on the development of cotton plants against the background of mineral fertilizers. In *Proceedings of the virtual international scientific-practical conference on "Current problems of modern agricultural and biological sciences: global challenges and innovations"* (pp. 225-229). Agricultural Research Institute of the Ministry of Agriculture of the Republic of Azerbaijan. Baku.
3. Aliyev, Ad.A., Abbasov, O.R. (2016). Igneous shales of Azerbaijan and their fields of application. *Earth and man.*, 6, 45-51.

4. Aliyev, Ad.A., & Abbasov, O.R. (2019). Mineralogical and geochemical proxies for the Middle Eocene oil shales from the foothills of the Greater Caucasus, Azerbaijan: Implications for depositional environments and paleoclimate. *Mineralia Slovaca*, 157-174.
5. Babayev, M.P., Gurbanova, E.A., Ramazanova, F.M., & Najafova, S.I. (2022). Lands of the Republic of Azerbaijan. Baku: "MSV Nashr" LLC. P. 63-66.
6. Hasanov, Y.C. (2011). Agrophysical properties of natural and anthropogenic soils of Ujar support station. In *Azerbaijan Reclamation and Water Management Open Joint-Stock Company AzHveM EIB Scientific Works* (Vol. XXXI, pp. 168-172). Baku, Science.
7. Movsumov, Z.R. (1978). Nitrogen in agriculture in Azerbaijan. Baku.
8. Mammadov, G.S. (2007). The basics of soil science and soil geography. Baku: Science publishing house. P. 361-366.
9. Mangrich, A., Tessaro, L., Dos Anjos, A., et al. (2001). A slow-release K<sup>+</sup> fertilizer from residues of the Brazilian oil-shale industry: synthesis of calcilite-type structures. *Env. Geol.*, 40, 1030-1036.
10. Mammedov, M.I., & Mammedova, S.A. (2021). Wagging joint application of mineral fertilizers with bentonite to the soil in order to prevent the loss of nutrients and the transition of their digestible forms. *Agrochemical Bulletin*, 54-59.
11. Turbas, E. (1992). Use of oil-shale ashes as a lime fertilizer in Estonia. *Oil Shale*, 9 (4), 301-309.
12. Taghiyev, R.A. (1986). Some issues of improving the technological quality of cotton fiber. *Agricultural science news*, 2, 19-22.
13. Zeynalov, S.B. (1997). The effect of various organic wastes on the productivity of corn in the conditions of meadow-forest soils. *Agrarian science of Azerbaijan*, 1-2, 31-33.
14. Zamanov, P.B. (n.d.). Effectiveness of organic fertilizers obtained from the recycling of common waste in Azerbaijan in agriculture. *A collection of works on soil science and agrochemistry*, 23 (1-2), 283-288.
15. Retrieved from <https://www.stat.gov.az>

*The article was received 07.06.2023 and was accepted after revision 31.08.2023*

**В.І. Джафаров**

## **ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ СИРОВИНИ ОРГАНО-МІНЕРАЛЬНОГО ПОХОДЖЕННЯ НА РОДЮЧІСТЬ ҐРУНТІВ У СІЛЬСЬКОМУ ГОСПОДАРСТВІ**

**Анотація.** Представлена робота стосується екології та хімічної технології, зокрема, способів виробництва добрив з осадів стічних вод та сільського господарства.

Масштаби виробничої діяльності збільшуються із зростанням населення, тому проблема оптимізації взаємодії людини і природи є актуальною і її вирішення має велике значення в поліпшенні навколишнього середовища. Стічні води є одним із побічних продуктів антропогенної діяльності. При їх очищенні утворюються осади (шлам). Обсяг і токсичність шламу, звичайно, зростає через зростання міст і інтенсифікацію промислового виробництва. За рік у європейських країнах утворюється близько 25-30 кг сухих осадів у розрахунку на одну людину.

Єдиної раціональної та екологічно безпечної, апробованої на сьогоднішній день технології утилізації осадів в нашій республіці немає, та й навряд чи буде створено найближчим часом, оскільки відкладення різних очисних споруд мають різні фізико-хімічні та біологічні властивості, а також абсолютно різні якісні та кількісні складові.

Очищення та утилізація таких відходів (осадів) є серйозною екологічною проблемою. Основними принципами її вирішення є сукупність еколого-економічних інтересів суспільства, екологічно безпечна утилізація та використання, залучення їх до господарського кругообігу. Проблема використання відходів на добрива має різні аспекти і невіддільна від проблеми родючості ґрунту та екології.

Виключне значення органічних речовин у підвищенні родючості ґрунту відомо давно. У зв'язку з цим застосування орґано-мінеральних комплексів, які впливають на



продуктивність і якість рослин, визначення ефективних норм удобрення та застосування нових технологій є актуальним питанням і має важливе теоретичне та практичне значення.

Родючість ґрунту дуже залежить від інтенсивності біологічних процесів, що в ньому відбуваються. Для життєдіяльності мікроорганізмів у ґрунті необхідні достатня кількість вологи, органічних речовин і сприятлива реакція ґрунтового розчину.

Для досягнення поставленої мети у напрямку вирішення цього питання розроблена технологія приготування органо-мінерального комплексу та застосування його для удобрення сільськогосподарських культур (бавовна).

**Ключові слова:** ґрунт; бавовна; органо-мінеральний комплекс; добриво; родючість.

*Стаття надійшла до редакції 07.06.2023 і прийнята до друку після рецензування 31.08.2023*

**Джафаров В.І.**

Міністерство науки та освіти Азербайджанської Республіки, Інститут ґрунтознавства та агрохімії

**Адреса робоча:** AZ1073 Азербайджан, м. Баку, вул. М. Рагіма, 5

**e-mail:** vcdiv@rambler.ru

УДК 502.3: 504.5

**Petro Kyriienko**<sup>1</sup>, PhD (Tech.sc), docent of Ecology Technogenic Safety  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8116-7448> **e-mail:** p.kirienko@khai.edu

**Yevhenii Varlamov**<sup>2</sup>, PhD (Tech.sc), Senior Researcher  
**e-mail:** y.varlamov@khai.edu

**Volodymyr Kvasov**<sup>2</sup>, PhD (Tech.sc), Senior Researcher  
**e-mail:** kvasovva34@gmail.com

**Serhii Lobov**<sup>1</sup>, PhD (Tech.sc), docent of Ecology Technogenic Safety  
ORCID ID: 0000-0002-5849-749X **e-mail:** s.lobov@khai.edu

<sup>1</sup>National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems (USRIEP), Kharkiv, Ukraine

## ORGANIZATION OF ATMOSPHERIC AIR MONITORING IN KHARKIV

**Abstract.** *The retrospective and current state of atmospheric air quality in the Kharkiv agglomeration was considered. The results of monitoring of atmospheric air quality in recent years have been studied. The research of the existing system state of observation and monitoring of atmospheric air in the city of Kharkiv was conducted. The procedure for organizing atmospheric air quality observations abroad is given. The measures are proposed to bring the current monitoring system into compliance with European standards and the requirements of legislative and regulatory documents of Ukraine.*

*It is necessary to determine a refined list of enterprises that exert the greatest man-made load on the agglomeration of the city of Kharkiv as a whole, to adjust the locations of stationary monitoring posts for atmospheric air pollution in the city of Kharkiv in order to ensure better quality monitoring, in particular in residential areas.*

*It is necessary to update the existing monitoring system, namely the arrangement of new indicative observation posts on the state of the atmospheric air, which will make it possible to conduct observations at these posts online for: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>.*

*In order to observe the state of the atmospheric air in places where there are no stationary posts, but there is an influence of industrial facilities, it is necessary to use route observation posts (fixed observation points), which must be monitored by a mobile analytical laboratory.*

*Information on the state of atmospheric air pollution should be available to executive authorities and all sections of the population, therefore, it is necessary to design and create an information and analytical system for monitoring the quality of atmospheric air.*

**Keywords:** *atmospheric air; pollutants; air monitoring; maximum permissible concentration; air pollution monitoring post.*

П.Г. Кирієнко<sup>1</sup>, Є.М. Варламов<sup>2</sup>, В.А. Квасов<sup>2</sup>, С.О. Лобов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків, Україна

<sup>2</sup>Український науково-дослідний інститут екологічних проблем (УКРНДІЕП), м. Харків, Україна

## ОРГАНІЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ЗА СТАНОМ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ У М. ХАРКІВ

***Анотація.** Розглянуто ретроспективний та сучасний стан якості атмосферного повітря в агломерації м. Харків. Досліджено результати спостережень за якістю атмосферного повітря за останні роки. Проведено дослідження стану існуючої системи спостереження та моніторингу атмосферного повітря в м. Харків. Наведено порядок організації спостережень якості атмосферного повітря за кордоном. Запропоновано заходи щодо приведення діючої системи моніторингу у відповідність до європейських стандартів та вимог законодавчо-нормативних документів України. Необхідно визначити уточнений Перелік підприємств, які здійснюють найбільше техногенне навантаження на агломерацію м. Харків у цілому, відкоригувати місця розташування стаціонарних постів спостереження за забрудненням атмосферного повітря в м. Харків з метою забезпечення більш якісного моніторингу, зокрема в селітебних зонах.*

*Необхідне оновлення наявної системи моніторингу, а саме облаштування нових індикативних постів спостережень за станом атмосферного повітря, що дасть змогу вести спостереження на цих постах в режимі он-лайн за: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, TCH<sub>2,5</sub>, TCH<sub>10</sub>.*

*Для проведення спостережень за станом атмосферного повітря у місцях, де відсутні стаціонарні пости, але є вплив промислових об'єктів, необхідно використовувати маршрутні пости спостережень (фіксовані точки) спостереження, на яких мають проводитись спостереження за допомогою мобільної аналітичної лабораторії.*

*Інформація про стан забруднення атмосферного повітря має бути доступною для органів виконавчої влади та для всіх верств населення, тому необхідно проектування та створення інформаційно-аналітичної системи з моніторингу якості атмосферного повітря.*

***Ключові слова:** атмосферне повітря; забруднювальні речовини; моніторинг стану атмосферного повітря; гранично допустима концентрація; пост спостереження забруднення атмосфери.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.81-90>

### Постановка проблеми

Україна здійснює на своїй території екологічну політику, спрямовану на збереження безпечного для існування живої і неживої природи навколишнього середовища, захисту життя і здоров'я населення від негативного впливу, зумовленого забрудненням навколишнього природного середовища, досягнення гармонійної взаємодії суспільства і природи, охорону, раціональне використання і відтворення природних ресурсів [1, 2].

Моніторинг якості атмосферного повітря в Україні має здійснюватися відповідно до вимог Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря, затвердженого постановою Кабінету Міністрів

України від 14 серпня 2019 року № 827 «Деякі питання здійснення державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря» [3] (далі – Порядок), зокрема за переліком показників, які визначені у списку А пункту 1 Додатка 2 Порядку.

Для України це важливо, оскільки в умовах повномасштабної війни росії проти України необхідно швидко не лише фіксувати, а й аналізувати реальні обсяги завданої шкоди довкіллю, аби на їх основі планувати заходи з відновлення довкілля.

## Актуальність

Наразі українська система моніторингу довкілля забезпечує лише констатацію факту перевищення показника забруднення. Вона не дозволяє отримати повну картину стану довкілля. Відповідно на основі цих даних складно ухвалювати важливі управлінські рішення.

Комплексний та систематичний збір екологічних даних дозволить здійснювати їх відповідний аналіз. Адже ми прагнемо не просто збирати екологічні дані і відкривати їх, як це передбачено Орхуською конвенцією, а й належним чином систематизувати їх [4].

Суб'єктами моніторингу атмосферного повітря в зонах та агломераціях України є регіональні представництва Міндовкілля, МОЗ, ДСНС, органи виконавчої влади з питань охорони навколишнього природного середовища [4].

Однак організація та методологія моніторингу забруднення атмосферного повітря натепер ще не зовсім відповідають стандартам ЄС.

Моніторинг якості повітря в ЄС. На відміну від України, де є дані про забруднення повітря лише на постах спостережень, підхід ЄС передбачає безперервність спостережень у просторі. Для цього території держав-членів ЄС поділяються на зони та агломерації. Агломераціями вважають міста і передмістя з населенням понад 250 тисяч осіб або інші території відповідно до вимог законодавства [5].

Покривати всю територію пунктами відбору проб нераціонально. Тому в ЄС для оцінки якості повітря використовують різні методи: фіксовані вимірювання з відбором проб, індикативні вимірювання і моделювання. Фіксовані вимірювання дають найточніше уявлення про вміст забруднювальних речовин в атмосферному повітрі, оскільки передбачають безпосередній аналіз проб повітря. При індикативному вимірюванні та моделюванні визначення концентрацій відбувається опосередковано. Такі вимірювання є недостатньо точними. Однак, основною перевагою цього методу є низька вартість і можливість отримати результати для більшої території, а не тільки в окремих точках.

Вибір методу вимірювання визначають за концентрацією речовини. Високі концентрації вимагають точної фіксації результатів вимірювань, у той час як для низьких концентрацій достатньо приблизної оцінки. Існує три режими вимірювання, що поєднують різні методи; для кожної зони та агломерації визначається свій специфічний режим оцінки (рис. 1).

Основними забруднювальними речовинами, за якими ведуть спостереження в ЄС, є діоксид сірки, діоксид азоту, тверді частки (ТЧ<sub>10</sub>, ТЧ<sub>2,5</sub>), озон і оксид вуглецю.

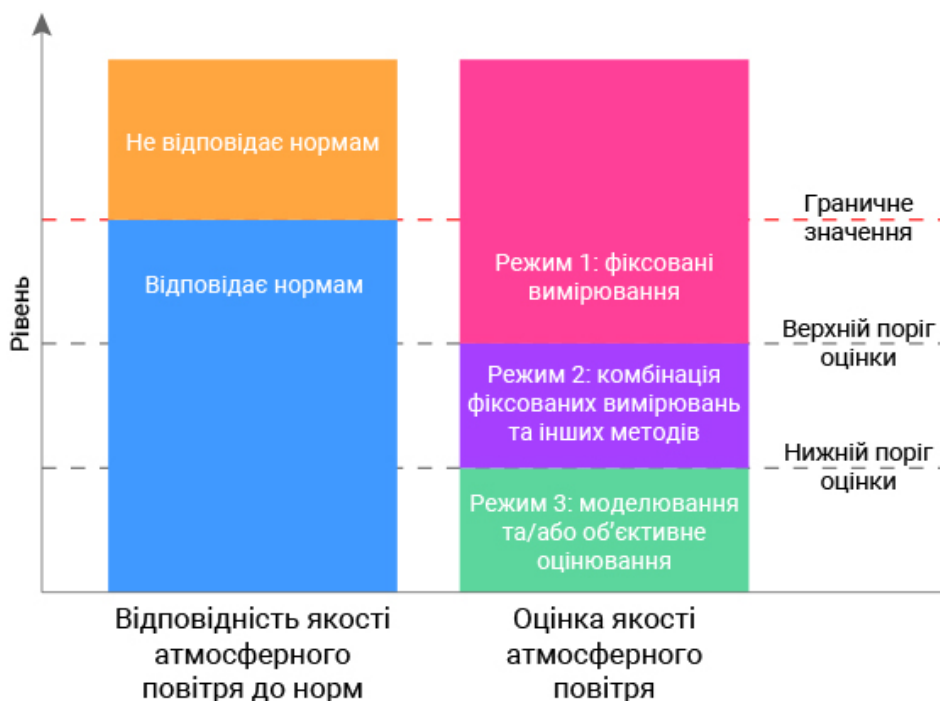


Рис. 1. Режими вимірювання показників верхнього та нижнього порогів оцінки і граничного значення

Європейські директиви встановлюють нормативи безпеки як для здоров'я людини (порог безпеки), так і для екосистем (критичний рівень).

Держави ЄС мають гарантувати дотримання граничних величин – рівнів вмісту речовин в повітрі, встановлених з метою уникнення, попередження чи зменшення шкідливих впливів на здоров'я людини та/або стан довкілля в цілому. Кожна держава визначає мету щодо зменшення впливу ТЧ<sub>2,5</sub> – відсоткове скорочення концентрації цих частинок у повітрі протягом визначеного періоду.

Якщо в певній зоні чи агломерації рівні забруднювачів перевищують будь-яку з граничних величин або будь-який цільовий показник, держава зобов'язана розробити план заходів для приведення показника до норми.

Директиви ЄС визначають, що інформація про якість повітря має бути безкоштовною і доступною для споживача.

Враховуючи наведене, з урахуванням наслідків військової агресії, проблеми щодо поліпшення стану атмосферного повітря, а особливо організації спостережень за якістю атмосферного повітря на європейському рівні в агломерації м. Харків є дуже актуальними.

### Виклад основного матеріалу

Авторами проведено дослідження ретроспективної і поточної інформації щодо якості атмосферного повітря та досліджено сучасний стан атмосферного повітря в агломерації м. Харків, а також у травні 2023 р. проведені одноразові

скринінгові дослідження за участю фахівців та сучасного обладнання – аналізатора атмосферного повітря ENVEA організації «Хімлаборреактив» м. Київ.

Екологічний стан м. Харків відзначається як стабільно напружений, хоча спад виробництва частково стримує наростання негативних процесів деградації навколишнього природного середовища. За обсягами забруднення навколишнього природного середовища, зокрема атмосферного повітря, Харків перебуває на 15-17-му місцях в Україні.

Антропогенне забруднення атмосферного повітря в м. Харків можна розділити на: викиди в навколишнє середовище від промислових підприємств (зокрема, від паливно-енергетичного комплексу); викиди від автомобільного транспорту; забруднення від інших джерел (спалювання листя, органічних відходів та ін.).

Серед причин забруднення атмосферного повітря в м. Харків можна вказати наступні: неякісне очищення викидів забруднювальних речовин на промислових підприємствах; використання застарілих систем очищення викидів; невикористання безвідходних і маловідходних технологій на промислових підприємствах; викиди забруднювальних речовин без очищення на побутовому рівні тощо.

Викиди від автомобільного транспорту в основному концентруються на шляхах з інтенсивним рухом, перехрестях і місцях скупчення транспорту.

Восени спалюють опале листя, відходи рослинництва, особливо на приміських територіях. В цей час відбувається збільшення викидів забруднювальних речовин в навколишнє середовище периферійних частин м. Харків.

Аналіз даних спостережень за станом атмосферного повітря агломерації м. Харків за 5 років відзначає тенденцію до погіршення якості атмосферного повітря по діоксиду азоту, фенолу, формальдегіду, кадмію, залізу, мангану, свинцю, хрому та цинку. Є незначна тенденція покращення якості атмосферного повітря по оксиду вуглецю, сажі та нікелю. Не змінився рівень забруднення по пилу, діоксиду сірки, сірководню, аміаку, оксиду азоту та міді.

Результати дослідження наявної інформації дозволяють зробити висновок щодо необхідності при проведенні спостережень застосування на даний період режиму фіксованих вимірювань або об'єктивного оцінювання для таких речовин, як діоксид азоту, діоксид сірки, оксид вуглецю, тверді частки (ТЧ<sub>10</sub>, ТЧ<sub>2,5</sub>).

Попередня оцінка якості атмосферного повітря у агломерації м. Харків показує, що спостереження проводяться суб'єктами моніторингу не в повній мірі.

Наразі основним джерелом визначення концентрацій забруднювальних речовин у м. Харків є відбір проб повітря на 10 стаціонарних постах спостереження мережі Харківського регіонального центру з гідрометеорології (Харківський РЦГМ) та їх дослідження в умовах стаціонарної аналітичної лабораторії, а також результати спостережень, що проводяться Харківським обласним центром контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України на 26 маршрутних точках.

Кількість стаціонарних постів або точок спостережень в населеному пункті має визначатись з урахуванням його розмірів, кількості населення і особливостей структури промисловості відповідно до вимог Порядку

розміщення пунктів спостережень за забрудненням атмосферного повітря в зонах та агломераціях, затвердженого наказом Міністерства внутрішніх справ України від 21.04.2021 № 300, що зареєстрований у Міністерстві юстиції України 13.05.2021 за № 635/36257 [6]. Для вирішення питання розташування стаціонарних постів контролю за станом атмосферного повітря з урахуванням фізико-географічних та метео-кліматичних умов вплив на вибір місця розташування має «роза вітрів» для м. Харків, рис. 2. Показник швидкості вітру є вихідною інформацією при аналізі переміщення атмосферних фронтів та інших видів динаміки в атмосфері, а також для оцінки вітроенергетичного потенціалу території.

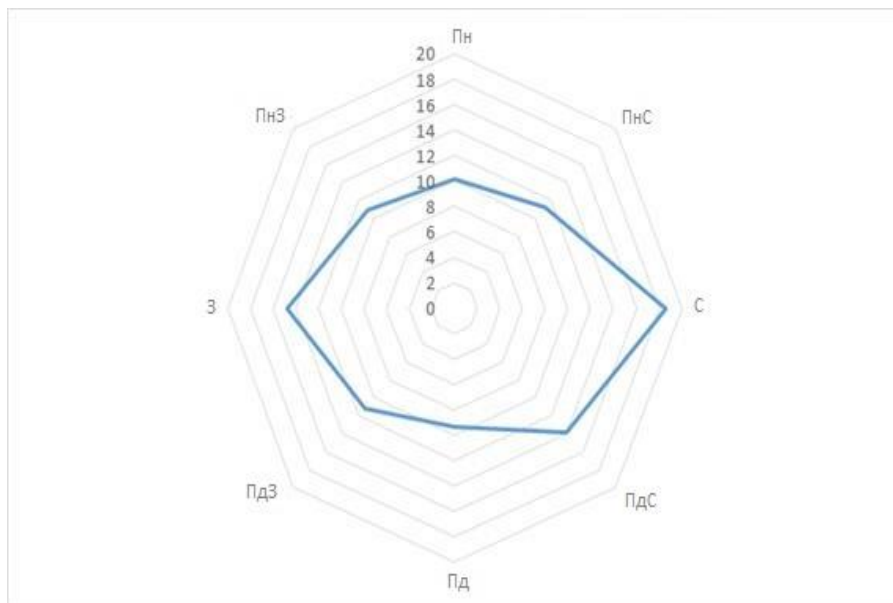


Рис. 2. Повторюваність (%) напрямку вітру (румби) у 2017–2022 роках

До 2022 року у Харківському регіональному центрі Гідрометслужби ДСНС функціонувало 10 постів спостереження. Розташування постів спостереження за забрудненням атмосфери в м. Харків було визначено ще за радянських часів і наразі потребує суттєвого коригування, з урахуванням сучасних потреб. Пости спостереження в Харкові являють собою стаціонарні пости типу ПОСТ-1 та ПОСТ-2, вигляд одного з постів наведено на рис. 3.

Станом на сьогодні два пости пошкоджено в результаті військової агресії і потребують повного відновлення.

Спостереження проводяться щоденно, крім святкових днів, по повній програмі і передбачають чотири виміри протягом доби. Відбір проб проводять у визначені часові проміжки відповідно до однієї з чотирьох програм спостережень: повної, неповної, скороченої або добової. Повна програма передбачає чотири виміри протягом доби: о 1-й, 7-й, 13-й і 19-й годині за місцевим часом. Неповна програма передбачає 3 виміри: о 7-й, 13-й, 19-й годині. Скорочена – два виміри – о 7-й і 13-й годині. Добова програма передбачає безперервні спостереження протягом доби.



Рис. 3. Пост спостереження за забрудненнями атмосферного повітря в м. Харків на перехресті вулиць для контролю впливу автотранспорту

Спостереження за концентраціями пилу (т.ч. –  $\text{TЧ}_{25}$  та  $\text{TЧ}_{10}$ ), діоксиду сірки, оксиду вуглецю, діоксиду азоту, свинцю, бензолу, арсену є обов'язковими. Інші речовини можуть бути включені до програми спостережень за рішенням органів місцевого самоврядування відповідно до специфіки екологічної ситуації [7].

Досліджуючи дані вимірювань на постах спостереження, наприклад, за 2017 рік, можна констатувати наступне.

Пил. З відібраних проб повітря 26% мають концентрації, що перевищують гранично допустимі. Індекс забруднення атмосферного повітря (ІЗА) пилом становить 0,65.

Оксид вуглецю. Середньорічна концентрація оксиду вуглецю в місті становить  $3,1 \text{ мг/м}^3$  ( $\text{ГДК}_{\text{CO}} = 3,0 \text{ мг/м}^3$ ). Індекс забруднення атмосферного повітря оксидом вуглецю в м. Харків становить 1,03.

Фенол. Спостереження за вмістом фенолу проводили на трьох постах спостереження. Середньорічна концентрація фенолу в місті дорівнює  $0,002 \text{ мг/м}^3$  ( $\text{ГДК}_{\text{ф}} = 0,003 \text{ мг/м}^3$ ), індекс забруднення атмосфери (ІЗА) фенолом – 0,5.

Важкі метали. Спостереження проводили на трьох постах. Відзначено зниження середньомісячних концентрацій заліза, міді, нікелю, цинку порівняно з даними 2016 року. Вміст в повітрі м. Харків кадмію, марганцю, свинцю та хрому залишився на рівні 2016 року.

Попередня оцінка якості атмосферного повітря у агломерації м. Харків визначила необхідність проведення вдосконалення існуючої системи моніторингу атмосферного повітря.

За результатами проведених досліджень можливо запропонувати, зокрема, створення автоматизованих постів спостереження, які мають функціонувати у режимі поточного часу (on-line), інформаційно-аналітичної системи даних, використання мобільної аналітичної лабораторії в проблемних місцях, проведення спостереження за усіма показниками згідно з вимогами Порядку. Встановлення на постах спостереження автоматизованого обладнання (індикативного) дасть можливість проводити спостереження у режимі поточного часу та отримати фактичні дані. Індикативні пости виконують вимірювання параметрів атмосферного повітря, які відповідають вимогам Порядку щодо точності даних, але є менш суворими, ніж вимоги до фіксованих вимірювань. Приклад такого поста наведено на рис. 4.

Необхідно розробити Програму державного моніторингу атмосферного повітря агломерації м. Харків з визначенням режимів оцінювання. Згідно з п. 9 Порядку режим оцінювання, крім режиму фіксованих вимірювань, може бути переглянутий раніше за рішенням органу управління якістю атмосферного повітря за таких умов: 1) режим оцінювання із застосуванням методів моделювання та об'єктивного оцінювання замінюється на режим



комбінованого оцінювання; 2) режим комбінованого оцінювання замінюється на режим фіксованих вимірювань. Згідно з п. 10 Порядку у разі наявності даних менш як за п'ять років для визначення перевищення нижнього та верхнього порогів оцінювання можна комбінувати результати короткострокових вимірювальних заходів протягом одного року на ділянках, рівень забруднення яких зазвичай є найвищим, що мають визначитися додатковими дослідженнями. У Програмі мають бути заплановані заходи щодо встановлення додаткових пунктів спостережень та/або вдосконалення наявних мереж спостереження за якістю атмосферного повітря, створення та/або вдосконалення лабораторій спостереження за станом атмосферного повітря.



Рис. 4. Індикативний пост спостереження типу ENVEA

В подальшому при удосконаленні мережі спостережень за станом атмосферного повітря на території агломерації м. Харків має бути розглянуто питання про розширення переліку забруднювальних речовин зі списку А пункту 1 Додатка 2 Порядку [2], які підлягають спостереженню, а станом на сьогодні для цих забруднювальних речовин можливе застосування режимів моделювання або об'єктивного оцінювання.

### **Висновки і пропозиції:**

1. Організація та методологія моніторингу якості атмосферного повітря на території агломерації м. Харків не в повній мірі відповідають стандартам ЄС.
2. Необхідно визначити уточнений Перелік підприємств, які здійснюють найбільше техногенне навантаження на агломерацію м. Харків у цілому.
3. Необхідно відкоригувати місця розташування стаціонарних постів спостереження за забрудненням атмосферного повітря в м. Харків з метою забезпечення більш якісного моніторингу, зокрема в селітебних зонах.
4. Необхідне оновлення наявної системи моніторингу, а саме облаштування нових індикативних постів спостережень за станом атмосферного повітря, що дасть змогу вести спостереження на цих постах в режимі он-лайн за: CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, O<sub>3</sub>, ТЧ<sub>2,5</sub>, ТЧ<sub>10</sub>.

5. Для проведення спостережень за станом атмосферного повітря у місцях, де відсутні стаціонарні пости, але є вплив промислових об'єктів, необхідно використовувати маршрутні пости спостережень (фіксовані точки) спостереження, на яких мають проводитись спостереження за допомогою мобільної аналітичної лабораторії, також ця лабораторія має проводити спостереження в місцях за запитом громадянськості.
6. Інформація про стан забруднення атмосферного повітря має бути доступною для органів виконавчої влади та для всіх верств населення, тому необхідно проектування та створення інформаційно-аналітичної системи з моніторингу якості атмосферного повітря.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Конституція України от 28.06.1996 № 254к/96-ВР – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.91 №1264-XI. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.rada.gov.ua>.
3. Постанова Кабінету Міністрів України від 14 серпня 2019 року № 827 «Деякі питання здійснення державного моніторингу у галузі охорони атмосферного повітря». – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/>.
4. Сайт Мінприроди <http://www.menr.gov.ua/>.
5. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 р. «Про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи» – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/>.
6. Наказ Міністерства внутрішніх справ України від 21.04.2021 № 300, зареєстрований у Міністерстві юстиції України 13.05.2021 за № 635/36257. – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/>.
7. Варламов Є.М., Квасов В.А., Брук В.В., Берешко І.М. Моніторинг навколишнього природного середовища. Концептуальні положення й шляхи реалізації: Монографія / Є.М. Варламов, В.А. Квасов, В.В. Брук, І.М. Берешко; під ред. Є.М. Варламова – Х. : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харк. авіац. ін-т», 2016. – 188 с.

*Стаття надійшла до редакції 15.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 06.12.2023*

## REFERENCES

1. Constitution of Ukraine dated 28.06.1996 No. 254k/96-ВР. (1996). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Law of Ukraine "On Environmental Protection" dated 06/25/91 No. 1264-XI. (1991). Retrieved from <http://www.rada.gov.ua>
3. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 827. (August 14, 2019). "Some issues of state monitoring in the field of atmospheric air protection". Retrieved from <http://zakon4.rada.gov.ua/>
4. Ministry of Natural Resources. Retrieved from <http://www.menr.gov.ua/>
5. Directive 2008/50/EU of the European Parliament and the Council. (May 21, 2008). "On atmospheric air quality and cleaner air for Europe". Retrieved from <http://zakon4.rada.gov.ua/>
6. Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine dated 04/21/2021 No. 300, registered with the Ministry of Justice of Ukraine on 05/13/2021 under No. 635/36257. (2021). Retrieved from <http://zakon4.rada.gov.ua/>

7. Varlamov, Ye.M., Kvasov, V.A., Bruk, V.V., & Bereshko, I.M. (2016). Monitoring of the natural environment. Conceptual provisions and ways of implementation: Monograph. E.M. Varlamov (Ed.). Kh.: National. Aerospace University named after M. E. Zhukovsky "Khark. Aviation Institute" [in Ukrainian].

*The article was received 15.09.2023 and was accepted after revision 06.12.2023*

**Кирієнко Петро Григорович**

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Адреса робоча:** 61070 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-8116-7448> **e-mail:** p.kirienko@khai.edu

**Варламов Євгеній Миколайович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, зав. сектором НДУ «УКРНДІЕП»

**Адреса робоча:** 61166 Україна, м. Харків, вул. Бакуліна, 6

**e-mail:** y.varlamov@khai.edu

**Квасов Володимир**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, зав. сектором НДУ «УКРНДІЕП»

**Адреса робоча:** 61166 Україна, м. Харків, вул. Бакуліна, 6

**e-mail:** kvasovva34@gmail.com

**Лобов Сергій Олександрович**

кандидат технічних наук, доцент Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»

**Адреса робоча:** 61070 Україна, м. Харків, вул. Чкалова, 17

**ORCID ID:** 0000-0002-5849-749X **e-mail:** s.lobov@khai.edu

## ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА CIVIL SAFETY

УДК 622.83

**Yevheniy Yakovlev**, D. S. (Engineering), Principal researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

**Oleksii Rogozhin**, D. S. (Economics), Principal researcher

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

**Dmytro Stefanyshyn**, D. S. (Engineering), Senior researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** d.v.stefanyshyn@gmail.com

**Dmytro Kreta**, PhD, Senior researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5897-0008> **e-mail:** dim.leo@gmail.com

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

### GEOECOLOGICAL AND ECONOMIC CONSEQUENCES OF CREATION, DRAINAGE AND POSSIBLE VARIANTS OF RESTORATION THE KAKHOVSKY RESERVOIR

***Abstract.** In the article, in the aspect of engineering and geological safety of structures and communications, the long-term hydrogeological consequences of the support and drainage effects at coastal areas of destroyed Kakhovskiy hydro node reservoir as a leading eco-forming component of a giant natural and man-made geosystem are considered. In particular, it included Zaporizhia NPP, the largest in Europe, and the largest irrigation systems in Ukraine. The consequences of the hydrodynamic disaster due to explosion of Kakhovskaya HPP, the dynamics and current state of drainage of the bed of its reservoir are briefly described, according to the data of GIS analysis of space images. And also – the state of hydrogeological and engineering-geological conditions in the reservoir support zone at the time of disaster and in retrospect. A calculated assessment of changes in hydrogeological conditions for the next 10-15 years has been carried out. Long-term natural and man-made threats that arose as a result of such changes in hydrogeological (geofiltration and geodynamic) conditions are named. The set of socio-economic threats that arose due to the negative consequences of Kakhovskiy reservoir existence and draining is described. It is emphasized that the restoration of hydrotechnical and water management parameters of the reservoir in the previous values (according to the conservative version) will lead to secondary geospatial water saturation of subsiding loess-loamy silty-clay floatingable rocks that have already undergone deformations due to a decrease in geotechnical stability during the initial flooding and subsequent drainage. This will start a new stage in the formation of dangerous violations of stress-deformed state of coastal slopes, of Zaporizhzhya NPP responsible structures foundation and in nearby cities and towns. A socially and ecologically favorable option for the rehabilitation of affected region is possible only on the modern European ideological and technological basis of taking into account the maximum permissible changes in the hydrological network, i.e. by means of: creating a cascade of low support channel*

reservoirs with locks and small hydroelectric power stations, reconstruction of riverside ponds and water supply systems, transfer of domestic water supply to underground sources, irrigated lands – for drip irrigation, ecological reclamation and afforestation of drained lands.

**Key words:** natural and man-made geosystem; Kakhovsky reservoir; catastrophic drainage; GIS analysis; hydrogeological conditions; subsiding loess-loamy floatingable rocks; geotechnical stability of structures and communications; socio-economic threats; ecological rehabilitation.

**Є.О. Яковлев, О.Г. Рогожин, Д.В. Стефанишин, Д.Л. Крета**

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

## **ЕКОЛОГО-ГЕОЛОГІЧНІ І ЕКОНОМІЧНІ НАСЛІДКИ СТВОРЕННЯ, ОСУШЕННЯ ТА МОЖЛИВИХ ВАРІАНТІВ ВІДНОВЛЕННЯ КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

**Анотація.** У статті в аспекті інженерно-геологічної безпеки споруд і комунікацій розглянуто довготривалі гідрогеологічні наслідки підпірного впливу та дренального осушення прибережних територій водосховища знищеного Каховського гідровузла як провідного екоформуючого компонента гігантської природно-техногенної геосистеми. До її складу, зокрема, входили найбільша в Європі Запорізька АЕС та найбільші в Україні зрошувальні системи. Коротко описані наслідки гідродинамічної катастрофи через підриє Каховської ГЕС, динаміка і сучасний стан осушення ложа Каховського водосховища за даними ГІС-аналізу космознімків. А також – стан гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов в зоні підпору водосховища на час катастрофи і в ретроспективі. Виконана розрахункова оцінка зміни гідрогеологічних умов на наступні 10-15 років. Названо довгострокові природно-техногенні загрози, що виникли внаслідок такої зміни гідрогеологічних (геофільтраційних та геодинамічних) умов. Описано комплекс соціально-економічних загроз, які постали через негативні наслідки існування та осушення Каховського водосховища. Наголошується, що відновлення гідротехнічних та водно-господарських параметрів водосховища у попередніх значеннях (за консервативним варіантом) призведе до вторинного геопросторового водонасичення просадкових лесово-суглинистих, пилувато-глинистих пливуноздатних порід, що вже зазнали деформацій внаслідок зниження геотехнічної стійкості при первинному затопленні та наступному осушенні. Цим розпочнеться новий етап формування небезпечних порушень напружено-деформованого стану прибережних схилів, підгрунтя відповідальних споруд Запорізької АЕС та у прилеглих містах і селищах. Соціально і екологічно сприятливий варіант реабілітації ураженого регіону можливий лише на сучасній європейській ідеологічній та технологічній основі врахування гранично припустимих змін гідрологічної мережі, тобто засобами: створення каскаду низькопідпірних руслових водосховищ із шлюзами та малими ГЕС, реконструкції природних ставків і систем водоводів, переведення побутового водопостачання на підземні джерела, зрошуваних земель – на крапельне зрошення, екологічної рекультиватії та заліснення осушених територій.

**Ключові слова:** природно-техногенна геосистема; Каховське водосховище; катастрофічне осушення; ГІС-аналіз; гідрогеологічні умови; просадкові лесово-суглинисті пливуноздатні породи; геотехнічна стійкість споруд; соціально-економічні загрози; екологічна реабілітація.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.91-116>

## Вступ

Підри́в російськими агресорами Каховської ГЕС та катастрофічне осушення її водосховища призвів до того, що вже запущено багаторічний процес жорсткої трансформації екосистем, економічних комплексів та соціальних спільнот, які сформувалися і досягли відносно рівноважного стану на місці знищених водою із будівництвом цього гідровузла у першому історичному акті техногенного перетворення Нижнього Дніпра.

Відносно цього ми приєднуємося до думки В. Богдановича [1], що після Каховської катастрофи (і руйнівної Російської війни) сформується нова соціоекосистема, доволі не схожа ні на попередню, ні на давній «Великий Луг», що тут розвинеться інший ландшафтно-географічний комплекс з іншою структурою поселень і землеробства, що до цієї даності доведеться пристосовуватися, що доведеться знову освоювати уражену територію, бажано з урахуванням потреб екологічної збалансованості, що слід налаштуватися саме на це, а не тішити себе надією повернення до щасливого минулого.

Але щоб цей процес відбувався менш болісно та призвів до поліпшення екологічного і соціально-економічного середовища, він має бути не лише державно керованим, а й якомога більш оптимізованим, хоча б за цілями (критеріями) сталого розвитку територій, однією з яких є екологічна безпека життєдіяльності населення та господарської діяльності, зокрема й геологічного середовища як територіальної і геохімічної основи для будь-яких природних та соціально-економічних систем.

У суспільстві закономірно виникла і, на жаль, швидко вщухла дискусія про те, яким слід відновлювати чи взагалі не відновлювати Каховське водосховище. Аргументами за його відновлення «як було» є виключно економічні та приватно-корпоративні: забезпечення потреб агробізнесу у зрошенні для овочівництва відкритого і закритого ґрунту, садівництва, виноградарства (але чомусь не згадують про потреби зернового господарства), забезпечення потреб судноплавства, забезпечення водопостачання великих (передусім видобувних і металургійних) підприємств Дніпропетровщини (що без цього вони працюватимуть із наполовину зменшеною потужністю), відновлення електрогенерації, а також – недолуга «лякалка» про перетворення осушеної території на пустелю (і це при річних опадах  $\approx 400$  мм). Аргументи проти висувають здебільшого представники освітньо-наукового співтовариства не лише з екологічних і соціогуманітарних міркувань, але доволі аргументовано заперечуючи адептам «як було», що можливі й інші варіанти відновлення місцевої економіки та забезпечення водопостачання на основі інших джерел та більш сучасних технологій (зокрема аргументи О. Гелевери [2]). Для нас в цій аргументації найближчою є теза про «уникнення небезпеки руйнування греблі водосховища», яка не може не посилитися після її відновлення на геотехнічно дестабілізованих просадкових і пливуноздатних осушених ґрунтах із слабкою несучою здатністю.

Крапку у цій дискусії поспішив поставити корпоративно-контрольований Кабмін України своєю постановою від 18.07.2023 р. «про експериментальний проєкт з початку відбудови Каховської ГЕС, яку підірвали росіяни», розрахований на 2 роки, причому нею передбачається, що на першому етапі буде спроектовано всі інженерні конструкції й підготовлено необхідну базу для відновлення. Замовником робіт призначено «Укргідроенерго», яке раніше

називало мінімальний термін на відновлення Каховської ГЕС у 5-7 років [3]. Але в цій постанові не передбачене розроблення докладного техніко-економічного і екологічного обґрунтувань, з яких у всьому світі починаються будь-які, особливо великі будівельні проєкти потенційно небезпечних гідротехнічних об'єктів.

Після відновлення незалежності України відомі гідротехніки (зокрема Є.А. Бакшеєв) оприлюднили свою думку щодо недостатньої обґрунтованості створення великого водосховища у нижній течії Дніпра, відмова від якого дозволила б, серед іншого, зберегти високопродуктивні екосистеми плавнів, нерестовища та не відселяти понад 50 тис. людей [4].

Тобто сьогодні ми опинилися в ситуації «дежа вю» і повернулися в точку біфуркації, коли стартували роботи з будівництва Каховського гідровузла (але тоді хоч були проведені широкомасштабні проєктно-пошукові роботи). Сподіваємося, що цього разу здоровий глузд таки візьме гору й фахові обґрунтування різних *варіантів відновлення* Каховського гідровузла будуть зроблені й саме на їх основі буде ухвалюватися рішення про початок будівництва. Кроком у цьому напрямі ми вважаємо й цю статтю.

Її **метою** є розгляд, в аспекті інженерно-геологічної безпеки споруд і комунікацій, довготривалих гідрогеологічних наслідків осушення водосховища знищеного Каховського гідровузла з урахуванням екологічних і соціально-економічних проблем, спричинених понад 67-річним існуванням створеної ним гігантської антиекологічної природно-техногенної геосистеми.

## Виклад основного матеріалу

**1. Антиекологічна природно-техногенна геосистема Каховського гідровузла як спадок гігантоманії «сталінського плану перетворення природи».** Перший етап формування цієї природно-техногенної геосистеми (ПТГС) розпочався в 1955 р. із введенням в експлуатацію гідровузла з ГЕС (потужністю понад 300 МВт) та наповненням Каховського водосховища, першого в Україні за площею. До складу Каховського гідровузла входять: шлюз та земельна гребля лівого берега, земляна руслова гребля, а також – бетонна водозливна гребля та будівля гідроелектростанції, нині зруйновані. Довжина напірного фронту гідровузла сягала 3650 м. Об'єм водосховища становив 18,2 км<sup>3</sup>, довжина – 230 км, ширина – 25 км, загальна площа водосховища – 2155 км<sup>2</sup>, середній підпір – 16 м. Цим водосховищем була знищена унікальна високопродуктивна частково окультурена екосистема плавнів Великого Лугу нижнього Дніпра майже на всій площі, з усіма її сіножатями, пасовищами, рибними й лісовими ресурсами – вміщуючий ландшафт формування сучасного українського етносу.

*Другий етап* формування технічної підсистеми новоствореної геосистеми завершено в середині 1990-х рр. із пуском останнього (шостого) енергоблоку Запорізької АЕС, коли та стала найбільшою в Європі та третьою у світі за сукупною потужністю (6000 МВт). Рис. 1 наочно демонструє те, що провідною економічною функцією Каховського гідровузла було *забезпечення водопостачання*, передусім для головних традиційних галузей української економіки: чорної металургії, агропромислового комплексу, ядерної та теплової енергетики. Це, зокрема, унікальні гірсько-металургійні комплекси – Криворізький (найбільший в Україні) із Зеленодольською ТЕС, що жилилися

каналом Дніпро – Кривий Ріг, Нікопольсько-Марганецький (із потужними феросплавним та трубопрокатним комбінатами), а також – Запорізька АЕС із Енергодарською ТЕС. Найбільші зрошувальні системи південних областей України (Херсонська, Запорізька, АР Крим, з їх аномальною розораністю, підтопленням та засоленням) також живилися саме з Каховського водосховища, зокрема Північно-Кримська і Каховська, як і декілька провідних підприємств переробки сільськогосподарської сировини.



Рис. 1. Схема природно-техногенної геосистеми нижнього Дніпра «Каховська ГЕС – Каховське водосховище – Запорізька АЕС»

Всі згадані виробництва й підприємства в процесі приватизації перейшли у власність крупного капіталу і досі становлять одну з найцінніших часток його активів. Тому й український уряд лобіює відновлення Каховського гідровузла за консервативним варіантом «як було», ігноруючи довгостроковий прояв негативних еколого-техногенних та соціально-економічних наслідків функціонування ПТГС «Каховська ГЕС – Каховське водосховище – Запорізька АЕС».

У тих самих 1990-х, було досягнуто просторово-часового квазірівноважного стану в зоні підпору Каховським водосховищем поверхневого стоку нижнього Дніпра та правобережного і лівобережного



потоків підземного стоку. А також – нестійкої геодинамічної рівноваги споруди намівної дамби ставка-охолоджувача Запорізької АЕС, побудованої з пісково-мулистих заплавних ґрунтів. Причому важливо, що вже на рівні реалізації проекту Запорізької АЕС була створена потенційна загроза гідро-геодинамічної нестійкості її ставка-охолоджувача (віддамбованої та фільтраційно незахищеної частини Каховського водосховища, площа  $S \approx 10 \text{ км}^2$ , об'єм  $V \approx 50 \text{ млн м}^3$ , середня глибина  $h \approx 5,0 \text{ м}$ ).

## 2. Гідродинамічна катастрофа і осушення водосховища Каховської ГЕС.

Дослідження геотехнічної надійності гідроспоруд Каховського гідровузла показали, що вони були достатньо стійкими та надійними в умовах природних впливів, в тому числі з урахуванням складних геологічних умов, зокрема можливих сейсмічних струшувань. Однак терористичний акт, який спричинив руйнування Каховської ГЕС, завдав незворотної шкоди від втрати важливого еколого-формуючого інфраструктурного об'єкта – Каховського водосховища, на основі якого ще в радянські часи сформувалося стійке соціально-екологічне середовище півдня України та розвивалася економіка трьох її областей та Криму.

Прорив греблі стався тоді, коли водосховище було переповнене (підпір понад 17 м) з формуванням хвилі прориву висотою до 5 м і швидкістю до 25 км на годину. Тому й площа та тривалість затоплення виявились більшими, ніж прогнозі оцінки (зокрема тривалість перевищила 5 діб). 6.06.2023 р. площа затоплення становила понад 430 км<sup>2</sup>, 7.06.2023 р. – понад 820 км<sup>2</sup>, потім воно поширилося на Кінбурнський півострів і далі, рис. 2. Загалом аварійного затоплення і підтоплення зазнали понад 80 населених пунктів в заплавах нижнього Дніпра і нижнього Інгульця, на узбережжях Бузького і Дніпровського лиманів.

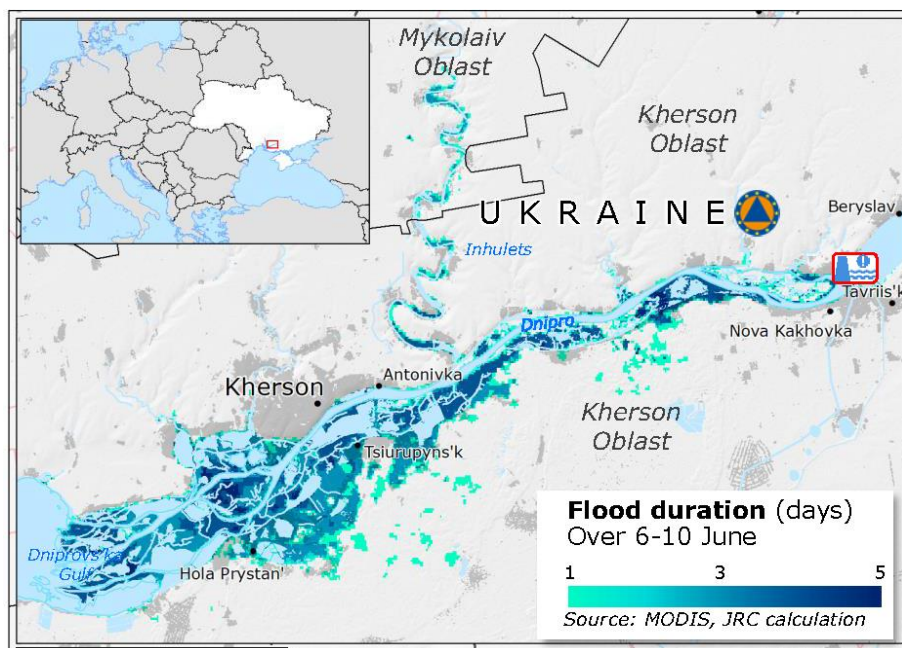


Рис. 2. Зона затоплення станом на 10.06.2023 р. (фрагмент інтернет-публікації ERCC (EU Emergency Response Coordination Centre))

Вибухове руйнування машинного залу Каховської ГЕС призвело до розвитку низки короткострокових (6-10 діб) та довгострокових переважно незворотних еколого-техногенних загроз передусім для *функціонування об'єктів інфраструктури*, зокрема критичної:

- формування розосереджених ділянок затоплення і підтоплення на площі понад 2500 км<sup>2</sup> значно урбанізованих територій до висоти малоповерхової забудови (максимальний рівень затоплення перевищує 5 м), виведення з ладу великої кількості об'єктів (систем водо-теплопостачання та водовідведення, лікувальних закладів, житлових будівель та ін.), нагальна евакуація декількох тисяч населення, ускладнена військовими діями та перманентними обстрілами;
- втрата та ускладнення джерел водопостачання для майже 10 млн людей: локальних (криниць і свердловин, затоплених забрудненими водами) та централізованих, включно з Північно-Кримським і Каховським каналами, водоводами Дніпро-Кривбас й на міста Нікополь та Марганець;
- зміна водно-екологічних умов підземних водоносних горизонтів (ускладнення умов експлуатації розвіданих родовищ питних підземних вод внаслідок регіонального зниження рівнів води; активізація перетоку забруднень з поверхні та незахищеного ґрунтового водоносного горизонту);
- активізація процесів затоплення і підтоплення покривної частини лесовопородного просядкового масиву з наступним зниженням міцності та інженерно-сейсмогеологічної стійкості підґрунтя численних житлових і промислових споруд;
- розвиток обвальних-зсувних та ерозійних процесів на осушених берегових схилах колишнього водосховища;
- розвиток процесів гідрогеофільтраційної компресії внаслідок осушення водонасичених та перезвожених лесово-суглинистих та пілувато-глинистих пливуноздатних ґрунтів з наступними небезпечними осіданнями земної поверхні.

Крім того, постали загрози: *втрати біологічних ресурсів* рибогосподарських водойм та заповідних територій; *регіональної міграції забруднень у ґрунтовий та напірні водоносні горизонти* внаслідок гідрогеофільтраційної міграції забруднень з місць масового мору риби, розкладання трупів тварин, затоплення і підтоплення звалищ промислових і побутових відходів; *погіршення ландшафтно-геохімічних умов сільськогосподарських угідь* через затоплення і підтоплення та привнесення забруднюючих речовин, органічних і неорганічних (пестицидів, поліхлорбіфенілів, важких металів, радіонуклідів тощо, депонованих у донних відкладах водосховища, а також з хімічної продукції, що зберігалася на затоплених територіях).

За оцінками Міжнародної комісії з великих гребель, лише прямі збитки від їх руйнування з утворенням хвиль прориву можуть перевищити вартість цих споруд на порядок і більше, а загальні збитки від таких аварій можуть перевищити вартість споруд на два і більше порядків. Питомий загальний збиток від аварійного вивільнення 1 м<sup>3</sup> води з водосховища може сягати від 10 до 100 доларів США. З огляду на наведені нормативи, для випадку катастрофи на Каховському водосховищі загальні, у тому числі довгострокові, збитки можуть досягти 1,8 трлн доларів США.

Причому найбільш катастрофічні наслідки руйнування гребель відбуваються через навмисні дії з підривом конструкцій гідропоруди зсередини, а не ззовні, тобто військовими інженерами, що володіють всіма необхідними знаннями, як найкраще завдати найбільших руйнувань споруді шляхом повного використання енергії вибуху, подібно тому, як це сталося на Каховському гідровузлі. Внаслідок саме таких аварій може бути завдана найбільша шкода довкіллю, населенню, інфраструктурі, водному господарству, комунальному господарству та економіці в цілому.

Особливістю аварії на Каховському гідровузлі є те, що руйнування відбулося в межах будівлі ГЕС з миттєвим розкриттям прорану на значній довжині. Загальна довжина будівлі ГЕС з монтажним майданчиком, де сталася подія, становить 212 м, що дорівнює понад 5% від протяжності усіх гідропоруд Каховського гідровузла (близько 3800 м). Такі розміри прорану достатні для того, щоб через швидке спрацювання рівня води у водосховищі сталося гідрогеокомпресійне ушкодження й земляних гребель гідровузла, які побудовані з водонестійких та пливуноздатних місцевих ґрунтів.

Осушення Каховського водосховища до рівноважного рівня сталося протягом 3 тижнів (рис. 3). За цей час площа водного дзеркала в його межах зменшилася, згідно з нашою картометричною ГІС-оцінкою (аналіз космознімків за 15-30.06.2023 р.), до 325,8 км<sup>2</sup> (відбулося зменшення водного дзеркала на 84,9%). За даними NAVIONICS на 15.08.2023 р. глибини у нижньому б'єфі зруйнованої дамби становлять 5-6 м, а у верхньому – 11-12 м. Тобто її підпір зменшився приблизно до 6 м.

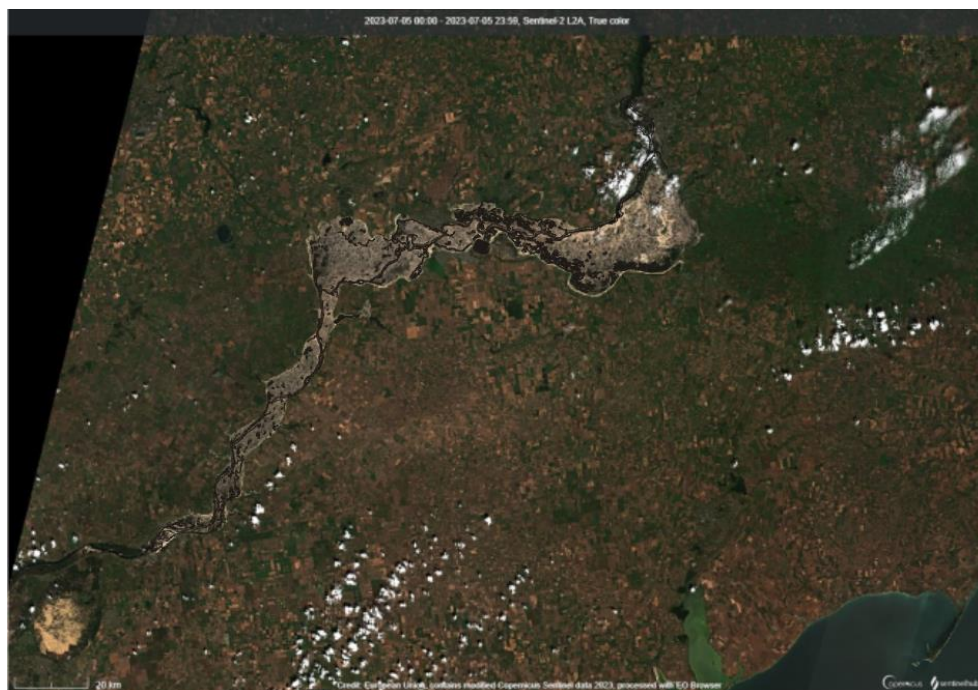


Рис. 3. Космознімок осушеного Каховського водосховища на 5.07.2023 р. у видимому діапазоні (Sentinel-2 L2A)

Усю сукупність можливих наслідків Каховської катастрофи в частині небезпечних змін стану інфраструктурних об'єктів та погіршення безпеки життєдіяльності важко передбачити без належного аналізу на основі моніторингу екологічних, технологічних та соціально-економічних параметрів ситуації, яку складно оцінити через системний характер аварії та її ланцюговий вплив на різні сфери і галузі й на економіку країни в цілому.

**3. Стан гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов в зоні підпору Каховського водосховища на час катастрофи.** Для вибору місця будівництва Каховського гідровузла на початку 1950-х років були виконані комплексні проєктно-пошукові роботи в пониззі Дніпра. Тоді було пробурено 30 тисяч свердловин, побудовано 120 штолень та 20 глибинних шахт, виконано значну роботу із визначення обсягу фільтраційних втрат з водосховища та розміру зони підпірного впливу на ґрунтові і артезіанські водоносні горизонти. Середні величини підпірного впливу на підвищення рівнів підземних вод на правому і лівому берегах за прогнозними оцінками сягали 35-50 км і більше (до 130 км у напрямку вододілу). Через це очікувана площа підпірного впливу Каховського водосховища на рівень підземних вод та на активізацію підтоплення земель, за умови досягнення ним узбережжя оз. Сиваш, перевищила 20000 кв. км (без врахування фільтраційних втрат в обхід споруд гідровузла, розвитку зрошувальних систем та втрат із водонесучих і водовідвідних систем). Така прогнозна оцінка значною мірою була обумовлена розташуванням шарів водопроникних порід у північному борті Причорноморського артезіанського басейну (між Дніпровською ГЕС у м. Запоріжжя та оз. Сиваш, де розташована зона висхідного розвантаження ґрунтового і напірних горизонтів), рис. 4.



Рис. 4. Схема інженерно-геологічних умов в зоні впливу Каховського гідровузла, що провокують активізацію небезпечних процесів: підтоплення, просідань, зсувоутворення, карстово-провальних форм

Тоді вперше у світовій гідробудівничій практиці за розрахунками проєктних організацій на таких породах було побудовано унікальну земляну греблю із дуже пологими відкосами й тому розосереджену на великій площі залягання потужної товщі нестійких ґрунтів-пливунів (товщина шару пливунів до 20-25 м).

Переважаання просадкових лесових та лесово-суглинистих порід у верхній частині геологічного розрізу зони підпірного впливу Каховського водосховища обумовило довгострокову регіональну активізацію підтоплення і затоплення земель, осідання земної поверхні, розвитку карстово-суфозійних процесів. Це ускладнило інженерно-геотехнічні умови експлуатації просторово розподілених об'єктів інфраструктури: ТЕС і АЕС, нафтогазопроводів, водопровідно-каналізаційних та теплоенергетичних мереж, залізниць, мостів тощо.

Такі геотехнічні умови будівництва і експлуатації інфраструктури у зоні підпірного впливу водосховища Каховської ГЕС були додатково ускладнені будівництвом системи зрошувальних каналів, що призвело в останні 50 років до стабільного розширення площ підтоплення земель (на 35000-50000 га щорічно) та до подальшого ускладнення умов експлуатації об'єктів інфраструктури (табл. 1).

Як засвідчує оновлена нами карта розвитку підтоплення в Україні на регіональному рівні, довгостроковий підпірний вплив колишнього Каховського водосховища на підвищення рівня ґрунтових і напірних підземних вод досяг узбережжя Чорного моря та оз. Сиваш [5]. Це відбулося ще на початку 1990-х рр., за цей час середня глибина залягання ґрунтових вод у цій зоні зменшилася з 10-15 м до 1,5-3 м, де досягла рівноважного рівня.

В умовах зростання негативного впливу глобальних змін клімату (потепління, збільшення кількості та нерівномірності опадів, ризику повеней), а також зарегулювання до 60-70% стоку малих і середніх річок у басейні р. Дніпро (де розміщено до 11-12 тис. ставків і водосховищ), варто очікувати активізації небезпечних екзогенних геологічних процесів і при аварійному зниженні рівня Каховського водосховища, і при формуванні зони стоку в його чашу зі зниженням рівнів ґрунтових і напірних підземних вод.

Таблиця 1. Картометрична ГС-оцінка площ підтоплення та кількості населених пунктів в їх межах у зоні підпірного впливу Каховського водосховища

Адміністративні області	Площа, км <sup>2</sup>			Кількість		
	2015	2002	різниця	2015	2002	різниця
Україна всього	161913	162949	- 1036	8639	8534	+105
Дніпровська	7683	7906	- 223	476	411	+65
Запорізька	6641	4782	+1859	324	243	+81
Миколаївська	9865	3449	+6416	458	184	+274
Херсонська	13918	6418	+7500	422	221	+201

**4. Стан регіональних гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов до створення Каховського водосховища.** У ландшафтному і інженерно-геологічному відношенні нижньодніпровські степи, вкриті чохлам лесових порід, поділяються на три основні області: підвищену *правобережну*

(з м. Херсон), порізану балками і долинами малих річок із просадковими лесовими породами; більш знижену *лівобережну*, пласкату з заглибленнями великих «подів» та просадковими лесами (до м. Мелітополь); знижену *лівобережно-причорноморську* (від м. Каховка до Кінбурнської коси), пласкату з «подами», вкриту алювіальними піщаними наносами давньої дельти Дніпра й непросадковими лесами.

Посушливі правобережні і лівобережні степи до створення Каховського гідровузла розділяла стрічка обводненої *нижньодніпровської і нижньоконської заплави*, затоплюваних у повінь «плавнів» (вкритих алювіальними наносами, павутинням проток, болотами, очеретами, луками та лісами): шириною від 5-7 км (між Херсоном та устям р. Базавлук) до 15 і 30 км (вище устя р. Базавлук, власне «Великий Луг»), рис. 5. У свою чергу Великий Луг поділявся (з заходу на схід) на: Базавлуцькі плавні (переважно низькі, ліси лише у вищій північній частині), Кам'янські плавні (переважно високі, лісисті), Конські плавні (переважно високі, з лісами вздовж річищ Дніпра і Конки).

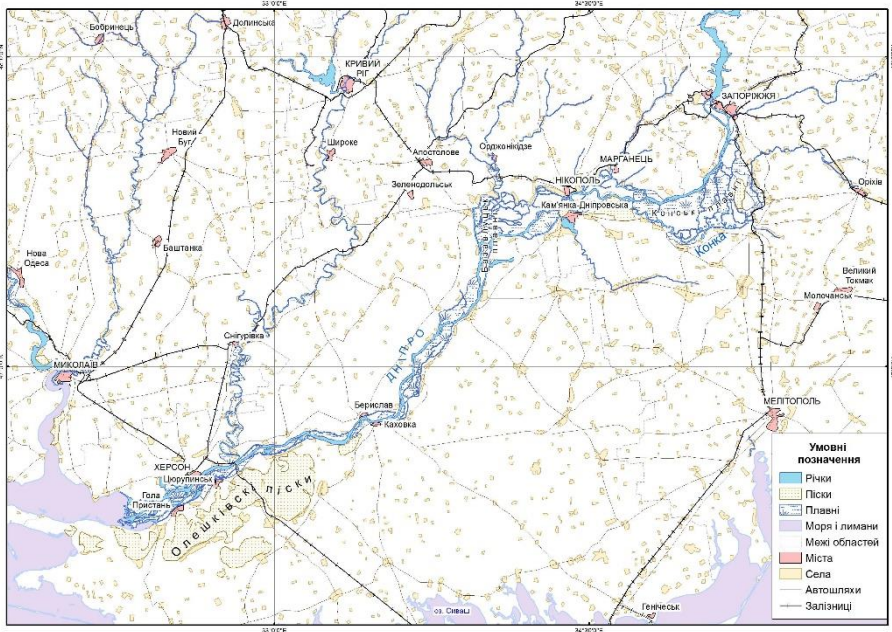


Рис. 5. Нижньодніпровські плавні на оцифрованому фрагменті «Политико-административной карты Украинской ССР и Молдавской ССР», 1951 р., М 1:750000

Показово, що наприкінці XVIII ст. водопостачання у м. Херсон здійснювалося лише з трьох глибоких колодязів (до 80 м, подача води паровою машиною). Автори цього повідомлення звертають увагу на те, що «використання для водопостачання міста артезіанських вод і відсутність дрібних колодязів у цей період свідчить про відсутність суцільного дзеркала підґрунтових вод» (на правому, високому березі Нижнього Дніпра). «Перше згадування про розвиток несприятливих інженерно-геологічних процесів в м. Херсон належить до середини XIX ст. Вони пов'язані з підтопленням і заболочуванням окремих ділянок території міста і «прибережних магістралей». Ці процеси були наслідком формування депресійних форм

рельєфу в результаті осідання (лесових порід), а також з утворенням суцільного дзеркала підґрунтових вод на території міста і їхнього розвантаження покрівлею червоно-бурих суглинків, що не дивно у зв'язку з повною відсутністю каналізації у місті» [6].

У другій половині XIX ст. кількість опадів, що випадала на *правобережжі* Нижнього Дніпра (Херсонський повіт Херсонської губернії), оцінювалася не менше ніж 400 мм на рік. У північно-східній частині Херсонського повіта (сучасні Високопільський та Нововоронцовський райони) ґрунтова вода відкривалася колодязями на глибині 8,5-17,1 м. Однак у південно-західній частині цього повіту (між містами Херсон і Миколаїв) інколи всі зусилля відкрити прісну воду не глибше 57,6 м (27 сажнів) залишалися марними, оскільки на такій глибині часто з'являлися припливи солоної морської води. Спостерігалось засолення й раніше прісних ґрунтових вод у колодязях глибиною 4,3-11,7 м. Таку міграцію засолення пояснювали появою солонців в місцевостях, де раніше не було помітно їх присутності, оскільки останні можуть постійно змінювати своє розташування. Через це землі, що лежать нижче перших, отримують солонцюватість, а ті, що вище – позбавляються її (промиваються атмосферними опадами). Зазначалося, що солі належать глинистій складовій чорноземних ґрунтів, звідки вимиваються. Причому солонців найменше там, де степи порізані балками й відбувається дренаж. Безстічні «поди», куди впадають балки і приносять води, являють собою постійні солонці. Відзначалося також, що ґрунтові води і самі річки Херсонської губернії постійно зменшують водність так помітно, що на пам'яті ще живого покоління (у 1820-50-х рр.) сталися величезні зміни [7, с. 229-223]. На нашу думку, це було пов'язане не лише із стрімким землеробським освоєнням території (та вирубкою вододільних і байрачних лісів тощо), але й із тогочасними глобальними кліматичними змінами, що супроводжували закінчення «малого льодовикового періоду».

На *лівобережжі* Нижнього Дніпра (Дніпровський та Мелітопольський повіти Таврійської губернії), де поширені найбільші «поди» України, глибина колодязів тоді становила 8,5-21,3 м, інколи до 42,7 і навіть до 128 м (60 сажнів). Відзначалося, що вода в них здебільшого солонувата й гіркувата, причому чим глибший колодязь, тим вода прісніша й приємніша на смак [8]. Тобто достатньої якості прісну воду мали лише при досягненні транзитного потоку артезіанських вод Причорноморського артезіанського басейну.

Регулярні спостереження за водним режимом Дніпра були організовані з 1876 р., зокрема й на водомірних постах Нижнього Дніпра (Каховка, Херсон тощо). На час реалізації проекту Каховського гідровузла були гідрографи не більше як за 60 років. Докладні метеорологічні спостереження запроваджені ще пізніше (Гідрометслужба СРСР створена у 1929 р.). Згідно з ними середня багаторічна кількість опадів в причорноморських степах і Північному Криму оцінювалася у 250-300 мм на рік, чого загалом достатньо для землеробства, якби не велика мінливість випадіння опадів у річному та багаторічному розподілах із наявністю тривалих посух та суховіїв, чергуванням сприятливих та посушливих років (а також швидкого випаровування зі спекотних степових рівнин) [9, с. 26-28, 45-46]. Подальші спостереження встановили дещо більшу середню багаторічну кількість опадів в херсонських степах (згідно з відповідною картою) – у 300-400 мм на рік [10, с. 87].

Але власне такі умови ризикованого землеробства (з акцентом на розвиток потужного зернового господарства) були ледь не головним пропагандистським аргументом щодо запровадження «сталінського плану перетворення природи» – «великих будов комунізму» для зрошення і обводнення південних степів, зокрема й південноукраїнських [11], рис. 6.



Рис. 6. «Великі будови комунізму» в південноукраїнських степах (навчальний географічний атлас 1952 р., виділено заплановані гідровузли)

Іронія історії полягає в тому, що ці грандіозні плани побудови гідровузлів і каналів були спрощеною калькою з «передового капіталістичного досвіду» 1920-1940 рр. – великих американських гідропроєктів, зокрема в басейнах річок Колорадо і Теннесі, реалізованих для забезпечення стабільного водопостачання і енергопостачання зростаючої промисловості міст та збільшення сільськогосподарського виробництва (передусім для військових потреб під час II Світової війни). Тобто саме для виконання аналогічних завдань у триваючій світовій конфронтації створювався (на рівні вже давно морально застарілих технологій першої половини XX ст.), зокрема, і Каховський гідровузол.

Але навіть з пропагандистської навчальної карти (рис. 6) стає зрозумілим, що реалізований варіант цього гідровузла був не єдиним. Там показано, крім нього, два гідровузли на р. Конка (у плавнях та вище плавнів) та ще один на р. Молочна. У такому разі підпір Каховського гідровузла мав би бути помітно нижчим за реалізований.

Відомо, що подавалися на розгляд декілька різних варіантів проєктів створення Каховського водосховища, причому деякі з них передбачали повне або часткове збереження плавнів. Згідно з одним пропонувалася *озерно-проточна система водойм з постійним коливанням в ній рівня води*, що забезпечувало збереження озер, протоків і річечок, які тут впадали в Дніпро. Також зберігалися лісові масиви. Але для цього слід було побудувати мережу насосно-перекачувальних станцій, на експлуатацію яких знадобилася б майже вся електроенергія, яку мала виробляти майбутня Каховська ГЕС. У архівах



було знайдено карту 1931 р., підготовану як схему-додаток до одного з проєктів Каховського водосховища, розробленого «Государственным институтом по проектированию гидротехнических сооружений НКС СССР». Згідно з ним, пропонувалося валами-дамбами захистити від затоплення 50 000 га Конських плавнів, 36 000 га – Базавлуцьких і 20 000 га – Кам'янських (разом 1060 км<sup>2</sup>, тобто 49,2% від реалізованої площі водосховища). Цей проєкт був відхилений через надмірні витрати електроенергії на перекачування води [12].

Але й за реалізованим проєктом практично вся згенерована у маловодні роки Каховською ГЕС електроенергія витрачалася на перекачування води в системи водопостачання і зрошення та на її відкачування з дренажних систем назад у водосховище.

Показово, що більша частина інформації щодо створення Дніпровського каскаду водосховищ у 1927-1978 рр. не була передана Україні спеціалізованими і військовими відомствами Росії, оскільки він побудований «по распоряжению руководства бывшего СССР как водный объект особо важного военно-стратегического значения, поэтому вся информация по нему глубоко засекречена» [12]. Та ж частина проєктної документації щодо створення Каховського гідровузла і ситуації до наповнення його водосховища, яка зберігалася в Україні в архіві харківського інституту «Укргідропроєкт», знищена пожежею внаслідок обстрілів російськими агресорами у 2022 р. Тому доводиться користуватися лише літературними джерелами та результатами власних розрахунків.

У [13, с. 247-248] зазначається, що після заповнення Каховського водосховища (до рівня 15 м у 1956 р.), в його береговій зоні рівень напірних підземних вод неогену (понтійські і сарматські відкладення) підвищувався зі швидкістю 0,1 м і більше на рік. Площа розвитку напірних вод збільшувалася в ширину на 1 км за рік. Такий підпірний вплив на правобережжі поширився до початку 1970-х рр. в ширину до 20-30 км, а на лівобережжі – до 40-50 км. Так, на лівобережжі у с. Чорнянка (приблизно 12 км від водосховища по трасі Північно-Кримського каналу) глибина до води в понтійських відкладеннях у свердловині спостереження зменшилася з 6 м до 0 м й досягла рівноважного рівня за 5 років (1956-1961 рр.) із виходом на денну поверхню. У с. Братолюбівка (15 км від затоки водосховища) глибина води у середньосарматських відкладеннях за три роки (1960-1963 рр.) зменшилася з 51,5 м до 49,75 м, так само, як і її мінералізація. Причому зменшення мінералізації неогенових вод на 10-70% на початок 1970-х рр. відбулося у стрічці шириною не меншій за 15 км по обидва боки водосховища.

Таким чином, після заповнення Каховського водосховища берегова зона стала областю гідрогеофільтраційного живлення та підпору і ґрунтових вод, і напірного комплексу горизонтів неогенових відкладів, що за 20 років призвело до регіонального підйому його рівнів на правобережній території на відстані до 30 км, а на лівобережній – до 60 км. Причому загальна площа підпору рівневої поверхні підземних напірних горизонтів ( $\approx 16000$  км<sup>2</sup>) до 7 разів перевищила власне площу водосховища (2150 км<sup>2</sup>) та площу зони катастрофічного затоплення внаслідок руйнування Каховської ГЕС (до 2500 км<sup>2</sup>).

**5. Розрахункова оцінка зміни гідрогеологічних умов за наступні 10-15 років.** Наведені вище дані щодо просторово-часового розвитку процесів затоплення та підпірного впливу Каховського водосховища свідчать про

регіональний вплив його осушення і перетворення цієї території у регіональну дренаж для формування зони депресії напірних та ґрунтового водоносних горизонтів.

В еколого-геологічному плані зазначений процес переформування екопараметрів геологічного середовища у зоні впливу осушеного Каховського водосховища став новим етапом розвитку його ПТГС, який відзначатиметься зниженням стійкості та ослабленням екологічних функцій геологічного середовища щодо демпфування впливу природних (гідрометеорологічних, сейсмічних) і техногенних чинників впливу, особливо в межах проммайданчика Запорізької АЕС (ЗАЕС).

Головними першочерговими небезпечними інженерно-геодинамічними наслідками перетворення території осушеного Каховського водосховища у регіональну дренаж є наступні:

1) прискорене регіональне зниження рівнів у напірних водоносних горизонтах неогенового комплексу із ускладненням умов експлуатації свердловин водопостачання;

2) осушення ґрунтового водоносного горизонту у прибережних ділянках, зокрема й нижче за течією, з активізацією зсувно-ерозійних процесів на осушених ділянках схилів (Нікопольська залізниця, м. Херсон та інші);

3) розвиток процесів гідргеофільтраційної компресії у слабопроникних просадкових лесово-суглинистих та пилувато-глинистих пилуноздатних ґрунтах (зокрема на проммайданчику Запорізької АЕС із небезпекою формування нерівномірних деформацій земної поверхні та підґрунтя її відповідальних споруд: реакторних блоків, градирень, турбогенераторних цехів, водоводів тощо).

Прогнозована середня швидкість зростання зони осушення (та збільшення глибини стояння ґрунтових вод) може бути оцінена за формулою (1):

$$V_t \approx 1,5 (a_y t)^{0,5}, \quad (1)$$

де:  $a_y$  – коефіцієнт п'єзопровідності напірних горизонтів неогену у зонах з підвищеною водопроникністю,  $a \approx (3 \div 5) \cdot 10^5$ , м<sup>2</sup>/добу;

$t$  – час розвитку дренажуючого впливу осушеного Каховського водосховища, днів.

Згідно з цією оцінкою швидкість зростання зони осушення зменшуватиметься експоненційно і після 10 років становитиме менше 6 м/добу (рис. 7).

Відповідно відбуватиметься й розширення фронту зони осушення, відстань до якого  $R_t = f(T)$ , оцінена за формулою (2):

$$R_t = 1,5 (a_y t)^{0,5}, \quad (2)$$

де:  $a_y$  – коефіцієнт п'єзопровідності напірних горизонтів у зонах з підвищеною водопроникністю,  $a \approx (3 \div 5) \cdot 10^5$ , м<sup>2</sup>/добу;

$t$  – час розвитку дренажуючого впливу Каховського водосховища.

Тобто основна площа зони осушення сформується за 1-2 роки (рис. 8).

Загалом за 10-15 років можливе наближення ситуації до ретро-гідргеологічних умов (до часу заповнення Каховського водосховища), оскільки русло Нижнього Дніпра відновить свій регіональний дренажувачий вплив. Але рівні ґрунтових вод у багатьох ділянках залишаться вищими за ретро-умови, оскільки залишилося багато технічних ставків зрошення, підтоплених ділянок, триває фільтрація з каналів тощо.

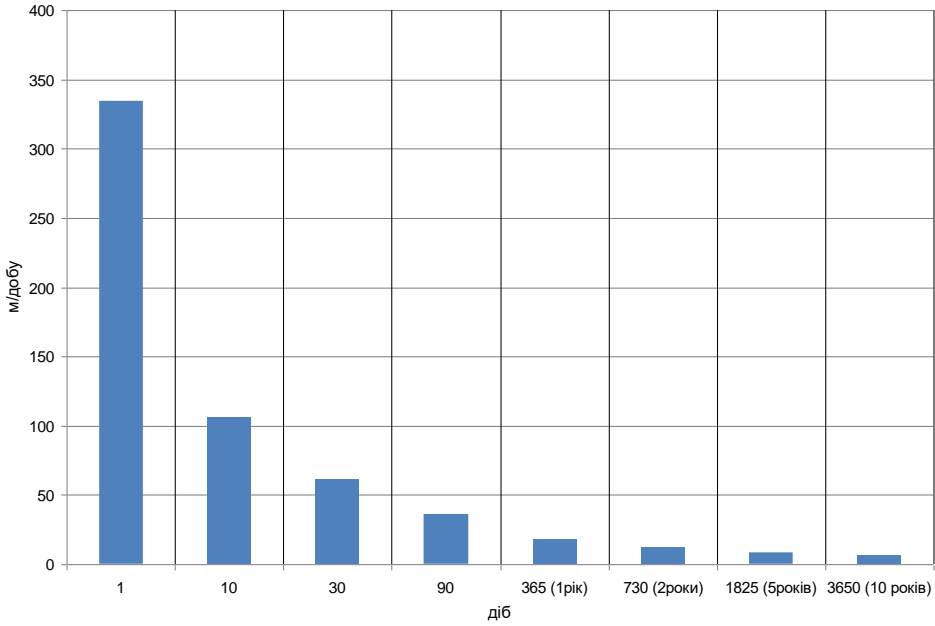


Рис. 7. Розрахункова швидкiсть руху зони осушення через зникнення Каховського водосховища,  $V_t$ , м/добу

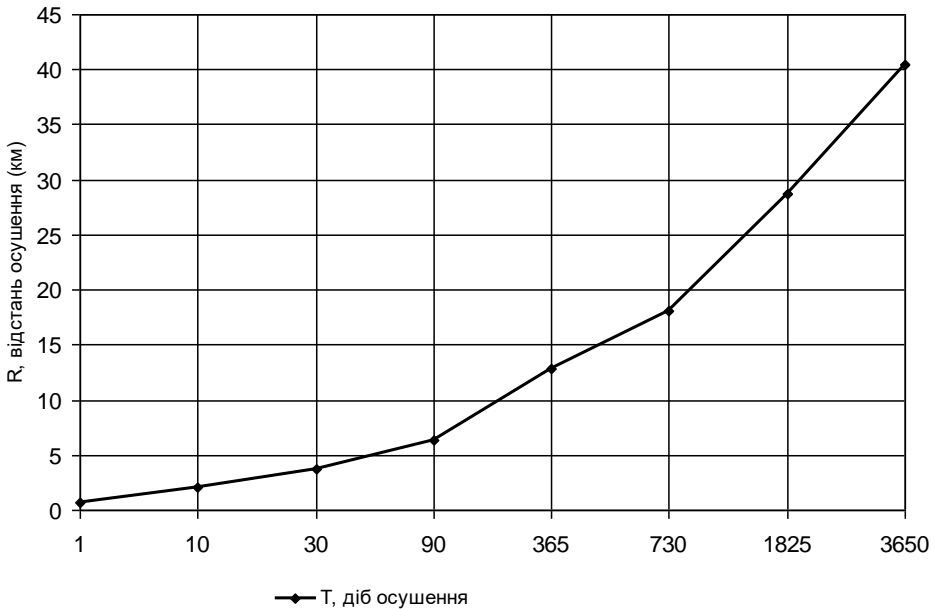


Рис. 8. Розрахункова динамiка просування фронту осушення  $R_t = f(T)$  в зонi впливу колишнього Каховського водосховища

**6. Довгостроковi природно-техногеннi загрози, що виникли внаслідок змiни гiдрологiчних умов.** Змiна гiдрологiчних умов пiсля катастрофiчно швидкого осушення Каховського водосховища прогнозовано призведе до погiршення умов життєдiяльностi та господарювання за такими видами довгострокового негативного впливу:

- активізація небезпечних екзогенних геологічних процесів (осідання, зсуви, у т.ч. на укосах дамб, зокрема ставка-охолоджувача Запорізької АЕС);
- погіршення інженерно-геотехнічних умов для забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури (зокрема, Запорізької АЕС) через зменшення сейсмічної інженерно-геологічної стійкості (до 1-2 балів за шкалою МСК-64);
- зменшення ресурсів питних підземних вод, локальне погіршення їх захищеності від поверхневого забруднення;
- вітро-пилова та водна міграція забруднених мулових мас у поверхневі та незахищені ґрунтові води, місцеві джерела водопостачання (побутові колодязі, ставки, свердловини).

Відповідно, основними реципієнтами такого негативного впливу будуть поверхневі, ґрунтові і підземні води, місцеве населення та об'єкти інфраструктури – житлові, промислові і транспортні споруди (мости, трубопроводи, канали, водоводи), зокрема й у об'єктів підвищеної небезпеки, таких як Запорізька АЕС.

У випадку Каховського водосховища особливе занепокоєння викликає розміщення в зоні його безпосереднього гідрогеодинамічного впливу проммайданчика Запорізької АЕС, в межах якого поширені чутливі до осушення та гідргеофільтраційної компресії пливуноздатні ґрунти. Наявні дані, зокрема й періоду інженерно-геологічних вишукувань, свідчать, що ці ґрунти здатні до фільтраційного ущільнення з деформаціями підґрунтя й фундаментів розміщених на них споруд та земної поверхні.

Геомеханічні параметри відповідальних споруд Запорізької АЕС (реакторні відділення, градирні, водоводи та дамби ставка-охолоджувача та ін.) були визначені для умов усталеного режиму рівня води в Каховському водосховищі. Внаслідок порушення цього режиму неминуче страждатиме інженерна безпека інфраструктури та водокористувачі на берегах осушеного водосховища. З часом негативні наслідки проявляться на значно більшій відстані через медіатор геологічного середовища – внаслідок порушення усталеного протягом понад 65 років зв'язку між рівнями поверхневих і підземних вод та рівноважного (напружено-деформованого) геомеханічного стану нестійких водонасичених ґрунтів у підґрунті відповідальних споруд (реакторних блоків, турбогенераторів тощо).

За результатами інженерних досліджень Харківського відділення інституту “Теплоелектропроект”, Київського інституту інженерних вишукувань, регіональних експедицій Мінгеології України, Інституту геологічних наук НАН України, у 1978-1987 рр. на території проммайданчика ЗАЕС було виявлено наступні критичні ускладнення інженерно-геотехнічних умов при будівництві й експлуатації Запорізької АЕС:

- наявність пухкої ґрунтово-породної зони на території проммайданчика та в середній частині греблі ставка-охолоджувача;
- розподіл нестійких у водонасиченому стані пісків від середньої крупності до пилюватих, від верху до низу греблі ставка-охолоджувача (що небезпечно в умовах перепаду рівнів Каховського водосховища);
- наявність в основі цієї греблі суглинків з домішкою рослинних залишків.

У 1993 році Харківський інститут «Енергопроект» виконав інженерно-геологічні вишукування у зв'язку з аварійним станом берегового укусу дамби ставка-охолоджувача на ділянці розміщення насосної станції-1 (НС-1). Найбільш вірогідними причинами, що викликали обрушення берегового укусу цієї дамби із деформацію бетонного покриття, були визначені:

- недостатнє ущільнення ґрунту зворотної засипки при будівельних роботах;
- зміна властивостей пісків зворотної засипки при самоущільненні (зменшення зчеплення, локальне пливунотворення, суфозія);
- вплив динамічних (вібраційних) навантажень від транспортних засобів в умовах нестійкості ґрунтів основи.

Тоді було зроблено наступний висновок: «Нестабільність гідродинамічного режиму водосховища внаслідок його аварійного осушення разом зі ставком-охолоджувачем обумовить небезпеку фільтраційної компресії підтоплених ґрунтів у підґрунті відповідальних споруд АЕС (блоки, градирні, водоводи тощо), порушення режиму охолодження реакторних блоків та загрозу розплавлення робочих зон реакторів з аварійним викидом радіонуклідів у приземну атмосферу та поверхневі водойми» (якщо ті не будуть переведені у режим «холодної зупинки»).

За результатами цих досліджень було визначено, що намивні піски тіла греблі ставка-охолоджувача динамічно нестійкі. Тому будь-які динамічні і статичні навантаження впливають на стан і фізико-механічні властивості ґрунту, погіршують його геотехнічні показники.

У період 1978-2011 рр. дослідженнями вищеназаних установ встановлено зменшення потужності прошарків пухких пісків в тілі греблі ставка-охолоджувача внаслідок суфозії та фільтраційної компресії в середньому на 35-40%. У цей період (понад 30 років) інженерно-геологічні умови в тілі греблі залишалися нестабільними, тривав процес доущільнення, зберігалася можливість подальших деформацій.

Відповідно, було багаторазово підтверджено, що проммайданчик ЗАЕС перебуває під впливом таких небезпечних інженерно-геологічних процесів і геодинамічних явищ:

- поширення техногенних ґрунтів, які характеризуються підвищеним стисканням та низькою несучою здатністю, можливістю розрідження при динамічному впливі (удар, вибух, землетрус);
- ускладнення інженерно-гідрогеологічних умов внаслідок водних втрат із водонесучих комунікацій, формування техногенного теплового поля;
- прояв суфозійних процесів і пов'язаних з ними нерівномірних просідань ґрунтів у підґрунті відповідальних споруд.

Аналіз дренаючого впливу аварійного осушення чаші Каховського водосховища засвідчує, що критичне погіршення інженерно-геологічних умов експлуатації об'єктів інфраструктури внаслідок зниження рівнів підземних вод у зоні його підпірного впливу обумовлене дією наступних чинників:

1) велика площа зниження рівня підземних вод (до 16000 тис. км<sup>2</sup>), що майже у 8 разів перевищує площу аварійного затоплення вздовж берегових зон р. Дніпро, де будуть відбуватися довгострокові просадки раніше підтоплених і затоплених лесових ґрунтів;

2) значний орієнтовний час зниження рівнів напірних вод ( $T_{zn}$ ) у колишній зоні підпору Каховського водосховища на відстані до 25 км ( $L_{п} = 25000$  м). Він становить:

$$T_{zn} = (L_{п}^2) : 2,25 a_y = [(25000)^2] : 2,25 \times (a_y) \approx 1470 \text{ діб} \approx 4 \text{ роки},$$

де:  $a_y$  – коефіцієнт п'єзопровідності напірних горизонтів у зоні підпірного впливу Каховського водосховища,  $a_y \approx 2 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{добу}$ .

Через це просторово-часовий розвиток у перезволоженому лесовопородному масиві небезпечних для споруд екзогеодинамічних процесів (осідань, зсувів, карстово-суфозійних деформацій тощо) буде мати стохастичну (невпорядковану) динаміку і довгостроковий період активізації у прибережних зонах р. Дніпро та на проммайданчику Запорізької АЕС.

І це, на жаль, не все. В умовах довгострокового підтоплення на території водно-екологічного впливу водогосподарського комплексу Каховської ГЕС та порушення водо-теплопереносу у лесопородному масиві (через системи зрошення, канали тощо) ще задовго до його руйнування відбулося суттєве погіршення інженерно-сейсмогеологічної стійкості підґрунтя та відповідальних споруд Запорізької АЕС (рис. 9), розташованих на пливуноздатних ґрунтах у зоні 6-бальних регіональних (транзитних) землетрусів (за шкалою МСК-64).

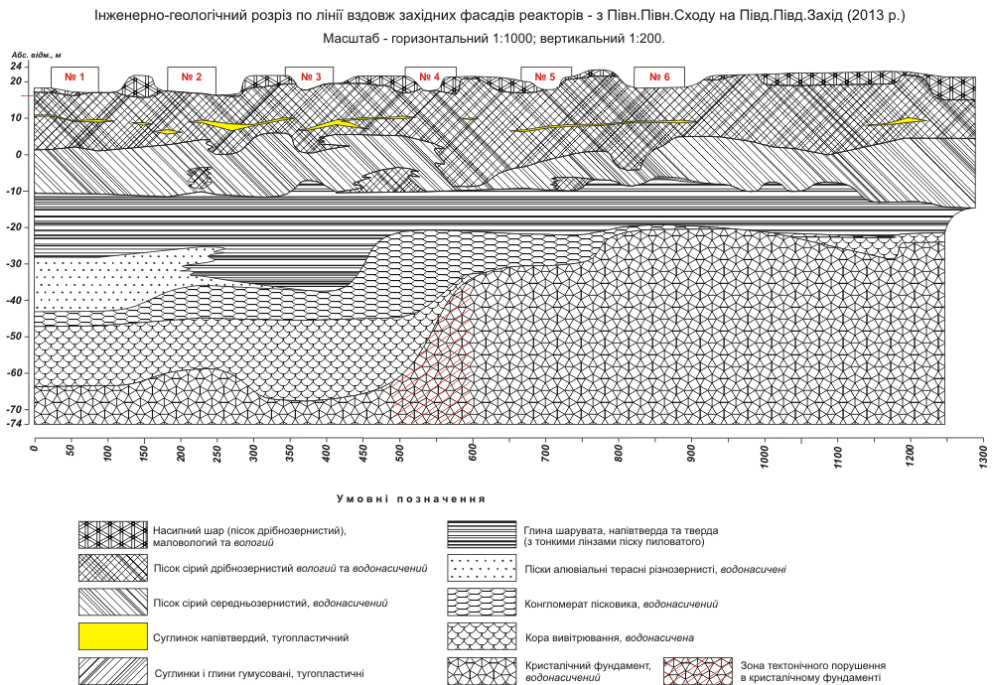


Рис. 9. Узагальнений інженерно-геологічний розріз водонасиченого підґрунтя проммайданчика Запорізької АЕС під час існування Каховського водосховища з НІР = 16 м

Джерело: [14], Графічний Додаток 24, Лист 2.

Причому низька проникність та фільтраційна анізотропія водонасичених лесово-суглинистих порід сприяє довгостроковому збереженню підйома

порового тиску у водонасиченій зоні та накопиченню впливу афтершоків. Аналогічно тому, як це відбулося під час транзитного румунського землетрусу 1986 р. у м. Херсон, коли в зволоженому лесовому ґрунті виникло явище тиксотропії, зменшилася його пористість та відбувся різкий підйом рівня підґрунтових вод із затопленням підвальних приміщень [6].

Досвід вивчення інженерно-геодинамічного прояву транзитного землетрусу на проммайданчику ЧАЕС (зона Вранча, Румунія, 30.05.1990) дає змогу визначити орієнтовний час збереження «стрибка» порового тиску  $T_c$  від першого максимального сейсмічного поштовху у межах підґрунтя великої споруди. Він може бути розрахований за відомими залежностями (3-5) [15].

Згідно з ними час  $t$  зниження порового тиску в слабопроникних породах  $P_{пор}$  з урахуванням мінімального розміру будівлі  $S_{min} \approx 80$  м розраховується наступним чином:

$$t \approx \frac{S^2}{2,25a}, \quad (3)$$

де:  $a$  – рівнепробудність слабопрониклих стиснутих порід в підґрунті блоку ЧАЕС, орієнтовно:

$$a = \frac{kh}{\mu}, \quad (4)$$

де:  $k$  – коефіцієнт фільтрації слабопрониклих порід (суглинків, лесів, піщано-глинистих прошарків),  $k \approx 1,0$  м/добу;

$h$  – товщина шару ґрунтового горизонту за умови його контакту з дном фундаменту,  $h \approx 20$  м;

$\mu$  – коефіцієнт водовіддачі,  $\mu \approx 0,1$ .

Тоді за попередніми оцінками:

$$t \approx \frac{80^2 \cdot 10^{-1}}{2,25 \cdot 1,0 \cdot 20} \approx 14 \text{ діб}. \quad (5)$$

Таким чином, повільне зменшення порового тиску може бути критичним фактором довгострокової реакції на афтершоки, в тому числі на техногенні вібрації (транспорт, будівельні роботи, вибухи), а тому й фактором зниження стійкості споруд Запорізької АЕС внаслідок додаткового розуцільнення порід підґрунтя.

**7. Комплекс соціально-економічних загроз через наслідки осушення Каховського водосховища і можливий варіант їх подолання.** Негативні економічні і оцінені соціальні наслідки через осушення Каховського водосховища формуватимуться за такими узагальненими позиціями: *прямі втрати* (явно завдані збитки, втрата майна, споруд, активів, втрата доходів у поточному фінансовому році), *опосередковані втрати* (витрати через ускладнення умов життєдіяльності і господарювання, наприклад енергопостачання, у поточному фінансовому році), *мультиплікатор втрат* (зокрема, не отриманий і недоотриманий дохід у наступних періодах), *додаткові видатки і капіталовкладення* (незаплановані витрати в поточному і наступних періодах) на пом'якшення і ліквідацію наслідків, компенсацію втрат. Причому останню позицію некоректно розглядати виключно як негатив, оскільки вона значною мірою є «інвестицією в майбутнє».

На нашу думку, основні очікувані негативні соціально-економічні наслідки розвиватимуться за такими видами збитку і реципієнтів впливу:

- порушення і вихід з ладу систем питно-господарського та технічного водопостачання, зав'язаних на водосховище (втрата активів, витрати на реконструкцію та капіталовкладення у введення в експлуатацію нових джерел, зокрема підземних);

- порушення енергопотоків через руйнування ГЕС та зупинку АЕС і ТЕС (втрата активів, витрати на збалансування енергопотоків, капіталовкладення у реконструкцію постачання та генерування, зокрема водойм охолодження);

- порушення роботи промислових підприємств через обмеження водо- і енергопостачання (втрата доходів, зростання безробіття тощо);

- велике зменшення площ зрошуваних земель (втрата активів, втрата доходів, зростання безробіття, витрати і капіталовкладення у нові технології землеробства тощо);

- погіршення умов судноплавства (втрата доходів і витрати на його відновлення);

- погіршення стійкості систем і споруд критичної та іншої інфраструктури (витрати на обстеження, витрати на дослідження, капіталовкладення для компенсування загроз);

- катастрофічне погіршення умов ведення традиційної господарської діяльності в зоні впливу осушення (спеціалізованого сільського господарства, рибництва і рибальства, присадибного господарства), зокрема посилення вразливості до глобальних змін клімату (втрата доходів і активів, витрати на компенсування);

- системна (зокрема структурна) криза місцевої економіки через зменшення природно-ресурсного потенціалу: земельного, водного, транспортного тощо (втрата активів і доходів, витрати на пом'якшення, капіталовкладення у структурні зміни);

- погіршення соціальних (передусім втрата звичних робочих місць) і медичних (через зниження якості води та харчів) умов життєдіяльності місцевого населення, рекреаційних ресурсів тощо (зменшення доходів домогосподарств і заощаджень, розпродаж активів, збільшення витрат на життєзабезпечення).

Криза місцевої економіки у будь-якому разі затягнеться на роки, причому вийти з неї навряд чи вдасться на консервативній основі простого відновлення доаварійних виробництв і напрямів господарювання в умовах різкого зменшення ресурсів водопостачання, нестачі населення (робочої сили), що здебільшого мігрувало з цієї території через руйнівні бойові дії та погіршення життєвих умов. Тому очікуємо неминучої зміни галузевого складу місцевої аграрної економіки зі зменшенням площ зрошуваного землеробства (особливо зернового господарства). Натомість можуть отримати розвиток масштабні фіто- і лісомеліоративні, гідромеліоративні та гідротехнічні роботи на сучасній технологічній основі в рамках програм ландшафтної реабілітації регіону.

Потребуватиме модернізаційної реконструкції й металургійний комплекс Криворіжжя та Нікопольщини, як і більшість крупних підприємств регіону, з переходом на сучасні більш ресурсоощадливі, зокрема водоощадливі технології.

За попередньою оцінкою НБУ економічної шкоди, завданої у зоні впливу зруйнованого Каховського гідровузла, негативний вплив її на економіку



України в цілому у короткостроковому періоді буде обмеженим. У зменшення реального ВВП України в 2023 р. він становитиме 0,2%, вплив на зростання інфляції – 0,3 процентного пункту, максимальні втрати в аграрному секторі в 2023 р. очікуються у \$0,4 млрд, в 2024 р. – у \$0,7 млрд [16].

Безпосередні економічні збитки, викликані підривом Каховської ГЕС, за даними дослідження KSE Institute, становлять майже \$4 млрд. У тому числі прямий збиток від затоплення житлових будинків (їх постраждало близько 20 000) і пов'язаної з ними інфраструктури оцінюється у \$950 млн (більша частина зосереджена на лівому березі Дніпра). Промисловому сектору та іншим підприємствам було завдано прямих збитків на суму, яка, за оцінками, дорівнює \$150 млн. Очікувані втрати від негативних змін у тваринництві через припинення водопостачання з водосховища сягнуть \$200 млн на рік. Втрата іригаційних систем (на площі майже 600 000 га) скоротить обсяг експорту сільськогосподарської продукції з України у 2023 році на \$1,5 млрд. На енергетичний сектор припадає прямих \$600 млн втрат. Щорічні економічні втрати держкомпанії «Укргідроенерго» оцінюються у додаткові \$100 млн. Для створення нової ГЕС тієї ж встановленої потужності знадобиться майже \$1 млрд (за оцінками «Укргідроенерго» на консервативне відновлення Каховського гідровузла  $\approx$  \$1,8 млрд). Для усунення наслідків руйнування ГЕС Комітет із питань бюджету парламенту України в середині червня 2023 р. схвалив виділення приблизно \$40 млн на будівництво магістральних водопроводів з інших джерел. Крім усього цього, очікувана сума шкоди, заподіяної навколишньому середовищу, становить приблизно \$2 млрд, а вартість очищення Дніпра оцінюється в \$1,5 млрд [17]. Тобто загальна сума безпосередньої шкоди від руйнування Каховського гідровузла у короткостроковому періоді сягає \$5,5 млрд.

Тому зрозуміло, що без великих інвестицій в господарство постраждалого регіону його потреби не будуть належним чином задоволені. Українська економіка в умовах руйнівної війни фінансово балансується лише безумовною допомогою наших західних союзників. Але така ситуація не може тривати нескінченно, доведеться конкурувати.

Багаторічний проєкт пост-катастрофічної реанімації території (економічної, соціальної, екологічної) зони впливу колишнього Каховського гідровузла теоретично може зацікавити іноземних інвесторів своєю масштабністю. Але щоб реально залучити у нього іноземні інвестиції, доведеться створити для іноземних інвесторів вигідні та сприятливі цивілізовані умови (хоча б: забезпечити безпеку і юридичний захист капіталовкладень під державні гарантії, низькі і стабільні податкові та митні ставки, належні юридичні та регуляторні умови; мінімізувати транзакційні витрати, корупцію та придушити рейдерство).

Загалом можливі два базові (і полярні) варіанти відновлення Каховського гідровузла: консервативний «як було» з реставрацією попереднього комплексу еколого-техногенних та соціально-економічних небезпек та соціально-екологічно оптимізований на основі *системи* руслових гідровузлів й прогресивних технологій водокористування – крапельне зрошення, зменшення втрат у інженерних мережах, відновлення місцевої річкової мережі в якості природних дрен тощо.

Наша орієнтовна оцінка капіталовкладень у два полярні варіанти економічної реабілітації ураженого регіону дозволяє припустити, що за

другим варіантом вона більша у 2-3 рази (щонайменше \$2-3,6 млрд). Але й очікуваний ефект перспективного соціально-економічного розвитку регіону за другим варіантом також очікується значно більшим (у середньо- і довгостроковій перспективі) – і через залучення більшого «донорського» капіталу з більшими виробничими потужностями, зайнятістю та тривалістю проекту, і через накопичення значно більшого еколого-ресурсного потенціалу (замість його посиленого розграбування за першим варіантом).

## **Висновки**

1. Каховське водосховище до свого осушення було базовим компонентом для формування екологічних функцій геологічного середовища у зоні впливу складної природно-техногенної геосистеми в складі Каховського гідровузла з ГЕС, його водосховищем, зрошувальними і водогосподарськими системами, Запорізькою АЕС, ТЕС (та їх геологічного середовища).

2. Відновлення гідротехнічних та водно-господарських параметрів Каховського водосховища (висоти підпору, об'єму, площі водної поверхні, систем зрошення) у попередніх значеннях за консервативним варіантом призведе до вторинного водонасичення просадкових лесово-суглинистих і пилувато-глинистих пливуноздатних порід, що зазнали деформацій при первинному затопленні та наступному осушенні. Цим розпочнеться новий етап формування небезпечних порушень напружено-деформованого стану прибережних схилів, підгрунтя відповідальних споруд Запорізької АЕС та у прилеглих містах і селищах.

3. Понад те, екологічні, гідрогеологічні та інженерно-геологічні параметри геосистеми Нижнього Дніпра обумовлені її розташуванням у зоні повільного транзиту та висхідного розвантаження вод (в Присивашші), що обумовлює активізацію підтоплення і затоплення земель, зокрема сільськогосподарських, та засолення ґрунтів при зарегулюванні поверхневого стоку і збільшенні інфільтраційного живлення при зрошенні та у забудові, особливо промислово-міській. Що й відбудеться при відновленні попередніх параметрів Каховського гідровузла. Тобто в цьому разі очікується подальше ускладнення гідрогеологічних і інженерно-геологічних умов, збільшення інтенсивності засолення ґрунтів та погіршення сейсмічної й інженерно-геологічної стійкості споруд, зокрема критичної інфраструктури.

4. За таких умов сумарні супутні втрати внаслідок реалізації консервативного варіанту «як було», особливо за неоптимальними тимчасовими схемами («давай-давай»), можуть перевершити економічний ефект від реанімації доаварійної економіки у зоні підпору Каховського гідровузла вже у середньостроковій перспективі (тобто за 5 років відновлення плюс 5 років формування наслідків).

5. Соціально і екологічно сприятливий варіант економічної реабілітації ураженого регіону можливий лише на новій (сучасній) ідеологічній (європейській, а не радянській) та технологічній основі. Згідно з нею, він має відбуватися засобами, зокрема: створення каскаду низькопідпірних (4-5 м) руслових водосховищ із шлюзами та малими ГЕС, реконструкції дамб прирічних ставків, системи водоводів (у трубопроводи) і проміжних водосховищ, переведення побутового водопостачання на підземні джерела, зрошуваних земель – на крапельне зрошення (замість сьогоднішнього дощування), екологічної рекультивації та заліснення осушених земель тощо.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Трагедія Великого Лугу. Копачі вже поїхали... Але! (18.06.2023). Електронний ресурс: <http://chas-time.com.ua/liudyna/tragediya-velikogo-lugu-kopachi-vzhe-pojikhali.html>
2. Чому не слід відновлювати Каховське водосховище. Електронний ресурс: <https://eco.rayon.in.ua/blogs/616673-chomu-ne-slid-vidnovlyuvati-kakhovske-vodoskhovishche>
3. Кабмін схвалив проєкт з відбудови Каховської ГЕС з експериментальними термінами (18.07.2023). Лія Ільченко. «Економічна правда». Електронний ресурс: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/07/18/702335/>
4. Бакшеев Е.А. Днепровские водохранилища и их народно-хозяйственный эффект. – К.: Довіра, 2008. – 159 с.
5. Рогожин О.Г., Яковлев Є.О., Крета Д.Л. Оновлена електронна карта прояву та розвитку підтоплення за причинами в Україні // Екологічна безпека та природокористування, вип. 2 (46), 2023. С. 124-137.
6. Еволюція гідрогеологічного стану під впливом урбанізації і меліорація ландшафту на території міста Херсона / В.О. Ушкаренко, В.В. Морозов, В.В. Жужа [та ін.] // Таврійський науковий вісник: зб. наук. пр. – Херсон: Айлант, 2002. – Вип. 21. – С. 112-125.
7. Материалы для географии и статистики России, собранные офицерами Генерального штаба. Херсонская губерния в 2 ч. / за ред. А. Шмидта. – СПб.: Военная типография, 1863. – 632 с.
8. Таврическая епархия / [Соч.] Гермогена, еп. Псковского и Порховского, бывшего Таврического и Симферопольского. – Псков : тип. Губ. правл., 1887. [2], IV, 520 с. Часть первая. Географическое положение Таврической губернии и общее понятие о ней: А. Северная часть Таврической губернии. Пространство ее, местность, почва земли, межевание, надел и ценность ее.
9. Гаврилов А.М., Попов И.В. Днепр идет в степь. Ленинград. Гидрометеоздат, 1951. – 63 с.
10. Атлас природных условий и естественных ресурсов Украинской ССР. АН УССР, Министерство высшего и среднего специального образования УССР. ГУГК, Москва, 1978. – 183 с. (Для служебного пользования, № 004045).
11. Яковлев А. Великие стройки коммунизма. Изд.-во ЦК ВЛКСМ «Молодая гвардия». М., 1951. – 70 с.
12. Куперман Юрій. Трагедия Великого Луга (3.04.2016). Електронний ресурс: [https://www.mv.org.ua/news/122462-tragedija\\_velikogo\\_luga.html](https://www.mv.org.ua/news/122462-tragedija_velikogo_luga.html)
13. Гидрогеология СССР. Том V, Украинская ССР / Ред. Ф.А. Руденко. «Недра», М.: 1971. 614 с.
14. Геолого-геофизические и сейсмологические исследования ближней зоны и промплощадки Запорожской АЭС. Инженерно-геологические разрезы в пределах промплощадки ЗАЭС, разрез А-А. / Дополнительные исследования сейсмических и сеймотектонических условий площадки Запорожской АЭС. Создание геодинамического полигона. 000 «Фундаментстроймакс», 2013.
15. Яковлев Є.О., Рогожин О.Г. Фактори і можливі наслідки регіональних змін інженерно-геотехнічного стану лесів та лесово-суглинистих порід України / Є.О. Яковлев, О.Г. Рогожин // Екологічна безпека та природокористування. – К. – Вип. 3(27). – С. 5-23.
16. Последствия разрушения Каховской ГЭС для ВВП Украины. Електронний ресурс: [https://iee.org.ua/ru/prog\\_info/62785/](https://iee.org.ua/ru/prog_info/62785/)
17. \$4 млрд уже заподіяної шкоди, довгострокових витрат ще на \$2 млрд. Яка ціна руйнування греблі Каховської ГЕС. Підсумував дослідник із фінансових ринків Сімеон Дянков. Forbes. 14.07.2023. Електронний ресурс: <https://forbes.ua/money/yakatsina-ruynuvannya-grebl-i-kakhovskoi-gidroelektrostantsii-14072023-14818>

*Стаття надійшла до редакції 01.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.11.2023*

## REFERENCES

1. The "Great Meadow" Tragedy. The diggers have already gone here ... But! Retrieved 18.06.2023 from: <http://chas-time.com.ua/liudyna/tragediya-velikogo-lugu-kopachi-vzhe-pojikhali.html>
2. Why the Kakhovsky reservoir should not be restored. Retrieved from: <https://eco.rayon.in.ua/blogs/616673-chomu-ne-slid-vidnovlyuvati-kakhovske-vodoskhovishche>
3. Ilchenko Leah. The Cabinet of Ministers approved the Kakhovskaya HPP reconstruction project with experimental terms. "Ekonomichna pravda". Retrieved 18.07.2023 from: <https://www.epravda.com.ua/news/2023/07/18/702335>
4. Baksheev E.A. (2008). Dnieper reservoirs and their national economic effect. Kyiv: Dovira. 159 p. [in Ukrainian].
5. Rogozhin, O.G., Yakovlev, E.O., & Kreta, D.L. (2023). The updated electronic map of the overwetting manifestation and development by causes in Ukraine. *Environmental safety and and natural resources*, 2(46), 124-137 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.2.124-137>
6. Ushkarenko, V.O., Morozov, V.V., Zhuzha, V.V. [et al.] (2002). Evolution of the hydrogeological state under the influence of urbanization and landscape improvement in the territory of the city of Kherson. *Tavrii scientific bulletin*, 21, 112-125 [in Ukrainian].
7. Materials for geography and statistics of Russia, collected by officers of the General Staff. Kherson province in 2 h. (1863). A. Schmidt (Ed.). St. Petersburg. Military printing house. 632 p. [in Russian].
8. Hermogen, ep. Pskov and Porkhov, the former Tauride and Simferopol (1887). Tauride diocese. Pskov. Printing house of the provincial government. [2], IV, 520 p. Part one. Geographical position of the Tauride province and the general concept of it: A. The northern part of the Tauride province. Its space, terrain, soil of the earth, surveying, putting on and its value [in Russian].
9. Gavrillov, A.M., & Popov, I.V. (1951). The Dnieper goes to the steppe. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
10. Atlas of natural conditions and natural resources of the Ukrainian SSR (1978). Academy of Sciences of the Ukrainian SSR, Ministry of Higher and Secondary Specialized Education of the Ukrainian SSR. GUGK. Moscow. 183 p. For official use, No. 004045 [in Russian].
11. Yakovlev, A. (1951). Great construction sites of communism. Publishing house Central Committee of the Komsomol. Moscow: "Molodaya gvardiya" [in Russian].
12. Kuperman, Yuri. The tragedy of "Great Meadow". Retrieved 3.04.2016 from: [https://www.mv.org.ua/news/122462-tragedija\\_velikogo\\_luga.html](https://www.mv.org.ua/news/122462-tragedija_velikogo_luga.html)
13. Rudenko, F. (Ed.). (1971). Hydrogeology of the USSR (Vol. V, Ukrainian SSR). Moscow: "Nedra" [in Russian].
14. Geological, geophysical and seismological studies of the near zone and industrial site of the Zaporozhye NPP (2013). Engineering-geological sections within the ZNPP industrial site, section A-A. Additional studies of seismic and seismotectonic conditions of the Zaporozhye NPP site. Creation of a geodynamic polygon. 000 "Fundamentstroymaks" [in Russian].
15. Yakovlev, E.O., & Rogozhin, O.G. (2018). Factors and possible consequences of regional changes of the engineer-geotechnical state of loess and loess-loamy rocks in Ukraine. *Environmental safety and and natural resources*, 3(27), 5-23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.3.5-23>
16. The consequences of the Kakhovskaya hydroelectric power station destruction for Ukraine's GDP. Retrieved from: [https://iee.org.ua/ru/prog\\_info/62785/](https://iee.org.ua/ru/prog_info/62785/)
17. \$4 billion in damage already caused, long-term costs for another \$2 billion. What is the price of destroying the Kakhovskaya HPP dam. Financial market researcher Simeon Dyankov summed it up. Forbes. Retrieved 14.07.2023 from: <https://forbes.ua/money/yakatsina-ruynuvannya-greblji-kakhovskoi-gidroelektrostantsii-14072023-14818>

*The article was received 01.09.2023 and was accepted after revision 29.11.2023*

**Яковлев Євген Олександрович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6562-4015> **e-mail:** yakovlevhydro@gmail.com

**Рогожин Олексій Георгійович**

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

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

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

**Стефанишин Дмитро Володимирович**

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** d.v.stefanyshyn@gmail.com

**Крета Дмитро Леонідович**

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

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5897-0008> **e-mail:** dim.leo@gmail.com

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ INFORMATION TECHNOLOGY AND MATHEMATICAL MODELING

УДК: 004.043

**Oleksandr Trofymchuk**, Corresponding member of the National Academy of Sciences of Ukraine, doctor of technical sciences, professor, Director of the Institute  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

**Victoria Itskovych**, PhD, Junior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1351-8178>

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

## METHOD OF PROCESSING INFORMATION ABOUT THE STATE OF THE ENVIRONMENT BASED ON DATA OBTAINED THROUGH A SERVICE-ORIENTED NETWORK

**Abstract.** *The task of the work is to develop a method of processing information about the state of the environment based on data received from a service-oriented network based on energy-efficient long-range protocols. As an example of the implementation of the method, the LoRaWAN technology was chosen, which is used in the city of Kyiv, in particular, to ensure the operation of "Kyiv Digital" services.*

*The solution to the problem lies in finding such a processing method that allows you to present the data received from the transmitters as a set. From this multiplication, with the help of a special symbolic language, data is extracted from which a pool is formed to present information about events at the research object. The latter is proposed to be implemented through an information convolution where information is separated by levels depending on the end user's request. The resulting rollup is not saved, since the primary information remains in the system database and can be used for subsequent requests for analysis or comparison.*

*This can be used in systems working with big data to control the current state of information processing, create samples for intermediate calculations, statistical studies and generalizations of the state of processes whose action is not completed.*

**Key words:** *digital city; Internet of Things; LoRaWAN; monitoring; information convolution; request; information provider.*

О.М. Трофимчук, В.Є. Іцкович

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ, Київ, Україна

## МЕТОД ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ПРО СТАН ДОВКІЛЛЯ НА ОСНОВІ ДАНИХ, ОТРИМАНИХ ЧЕРЕЗ СЕРВІС-ОРІЄНТОВАНУ МЕРЕЖУ

***Анотація.** Задачею роботи є розробка методу обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих від сервіс-орієнтованої мережі на базі енергоефективних протоколів далекого радіусу дії. Для прикладу реалізації методу обрана технологія LoRaWAN, яка застосовується в м. Київ, зокрема, для забезпечення роботи сервісів «Київ цифровий».*

*Вирішення поставленої задачі полягає у знаходженні такого методу обробки, який дозволяє представити отримані дані від давачів як деяку множину. З цієї множини за допомогою спеціальної символічної мови вичленовуються дані, з яких формується пул, для представлення інформації про події на об'єкті дослідження. Останнє запропоновано реалізувати через інформаційну згортку, де відбувається вичленування інформації за рівнями в залежності від запиту кінцевого користувача. Отримана згортка не зберігається, оскільки первинна інформація залишається в базі даних системи і може бути використана за наступними запитами для аналітики чи порівняння.*

*Зазначене може бути використане в системах, що працюють з великими даними, з метою контролю поточного стану обробки інформації, створення вибірок для проміжних розрахунків, статистичних досліджень та узагальнень стану процесів, дія яких не завершена.*

***Ключові слова:** цифрове місто; Інтернет речей; LoRaWAN; моніторинг; інформаційна згортка; запит; давач інформації.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.117-129>

### Вступ

Розробка інформаційної технології (ІТ), яка дозволяє на основі сервіс-орієнтованої мережі отримувати та обробляти велику кількість даних про стан підключених об'єктів і систем, є актуальним завданням сьогодення. Найвідоміші приклади реалізації такої технології – «розумне» або цифрове місто [1], «розумний дім» [2] з різноманітним застосуванням концепції Інтернету речей (ІоТ) [3]. В основу інформаційної технології на основі сервіс-орієнтованої мережі закладено інформаційний обмін (передачу інформації) від давачів-джерел інформації до серверів, розташованих на значній відстані від об'єкта спостереження. На цих серверах відбувається отримання, систематизація та обробка інформації в залежності від вимог кінцевого користувача. Отримання інформації від сервіс-орієнтованої мережі може розглядатися як розробка підсистеми моніторингу діяльності деякої складної системи з чітко визначеними параметрами та обмеженнями для виконання прогнозованих задач у заданий час. Таке твердження впливає із розуміння сервіс-орієнтованої архітектури (SOA) як модульного підходу до розробки програмного забезпечення зі змінними компонентами [4] та функціонального сервісу реального часу у вигляді вебзастосунку [5]. А враховуючи сучасне розуміння ІоТ [3] як універсального поєднання фізичних пристроїв [6] в мережу із можливістю розміщення вбудованих передавачів інформації та програмного забезпечення для передачі та обміну даними [7], можна

концепцію IoT розглядати як базову для комплексної взаємодії окремих пристроїв в мережі, орієнтованої для вирішення окремих задач складної системи, де замість купи операторів, які слідкують кожен за своєю ділянкою роботи, «працюють» датчики, що моніторять стан та передають дані на сервер для обробки. Такий підхід вже використовують великі промислові підприємства [6], бо це дозволяє не лише вирішити проблему енерговитратності, а й принести окремий прибуток за рахунок пришвидшення обміну інформації для прийняття управлінських рішень [8].

І тут варто зазначити, що проблема енергоефективності є одним з головних пріоритетів сучасного мегаполісу [9]. А блек-аути останніх часів, пов'язані з активною фазою вторгнення військ російської федерації на територію України, довели, наскільки це питання є актуальним. Тепер жоден проєкт, жодна робота комунальних служб чи організацій сфери забезпечення не розпочинається без оцінки енерговитрат.

Проте, коли стоїть задача забезпечення безпеки життєдіяльності будь-якого населеного пункту, а, особливо, великого міста, проблема енергоефективності дещо відходить на другий план [10], хоча не зникає, а підсилює свої акценти [11]. А об'єднати ці питання одним комплексним рішенням дозволяє об'єднання міських комунікацій, інформаційних технологій передачі даних, пристроїв IoT в рамках системи «розумного міста» (Smart City) [12].

Безпека життєдіяльності «розумного міста» включає у себе важливий фактор – забезпечення екологічних параметрів функціонування мегаполісу. Тому в автоматизованих системах функціонування «розумного міста» здійснюється постійний моніторинг стану повітря, особливо стосовно роботи підприємств та викидів від автомобілів, води і ґрунту, з контролем гранично допустимих концентрацій (ГДК) основних забруднювачів, стану зон відпочинку, техногенного навантаження на вулицях і проспектах, відслідковування залежностей між трафіком транспорту, кліматичними умовами та впливом на показники життєдіяльності.

За допомогою подібної IT на основі сервіс-орієнтованої мережі отримується та передається велика кількість даних на значні відстані. Тому актуальним питанням є розробка таких методів та підходів обробки інформації, які дозволяють створювати вибірки за необхідними параметрами, що відображають стан системи, відносно якої здійснюється моніторинг, і ця обробка повинна відбуватися в режимі реального часу з мінімальними втратами даних.

## **Постановка задачі**

Задача роботи полягає у розробці методу обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих від сервіс-орієнтованої мережі на базі енергоефективних протоколів далекого радіусу дії. У теперішній час виділяють чотири передові технології IoT, які є актуальними через низьку потужність глобальних мереж (LPWAN). Якщо порівнювати це з технологіями, наприклад мережевого або бездротового зв'язку малого радіусу дії, то LPWAN може забезпечити підключення на значні відстані приладів IoT з низьким енергоспоживанням та швидкістю передачі даних [13]. Для вирішення питань збору та передачі інформації про стан довкілля з можливістю подальшої обробки задля активізації/коригування дій



різноманітних служб, що відреагують на ситуацію, яка склалася, міста використовують LoRaWAN, NB-IoT, LTE-M, SigFox [44]. Для прикладу реалізації методу обрана технологія LoRaWAN, яка застосовується в м. Київ для забезпечення роботи міських сервісів.

Вирішення поставленої задачі полягає у знаходженні такого методу обробки, який дозволить представити отримані дані від давачів як деяку множину. З цієї множини за допомогою спеціальної символічної мови вичленюються дані, з яких формується пул, для представлення інформації про події на об'єкті дослідження.

Під пулом в інформаційних технологіях розуміється набір фізичних чи віртуальних об'єктів для виконання однієї спільної функції [14]. Інформація пулу обробляється за запитом та представляється у затребуваній користувачем формі. Після цього її збереження не обов'язкове, адже множина первинних даних знаходиться в базі даних і в будь-який момент можна зробити новий запит на створення пулу.

Створення такої вибірки інформації може базуватися на наявних у базі даних записах щодо об'єкта спостереження. Для цього можна використовувати технологічні карти та мережні графіки процедур, що входять до стандарту специфікації LoRaWAN.

### Вирішення поставленої задачі

Сукупність знань про стан довкілля мегаполісу наведена у різноманітних нормативно-правових актах, звітах, розпорядженнях, аналітичних записках та інших документах департаментів та служб. Їх можна представити як початкову інформацію підсистеми спостереження за станом параметрів середовища міста і представити формально як суму записів у базі даних, яка використовується для роботи окремих сервісів мережі, як дані про наявні ресурси ( $X$ ), які мають вплив на забруднення території; норми, регламенти та протоколи роботи (НРП), тобто обмеження, з порушенням яких можуть виникнути ситуації щодо перевищення ГДК ( $Y$ ), та власне записи моніторингу на основі показників давачів інформації про стан об'єкта, за яким відбувається спостереження (набір даних від давачів) ( $Q$ ):

$$X(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n x_i(a, b, c, d), \quad (1)$$

на множині записів про ресурси  $I = \{ i \mid 1 \leq i \leq n \}$ ,

де:  $a$  – вид, найменування ресурсу, що впливає на стан довкілля;

$b$  – кількість джерел забруднення;

$c$  – структурна належність цих джерел до об'єкту забруднення;

$d$  – значення показника від давача на момент часу  $t$ .

Аналогічно можна представити запис щодо застосування норм, регламентів та протоколів у разі виникнення ситуації з перевищенням ГДК забруднювача. Тобто, на множині записів про НРП  $J = \{ j \mid 1 \leq j \leq m \}$ :

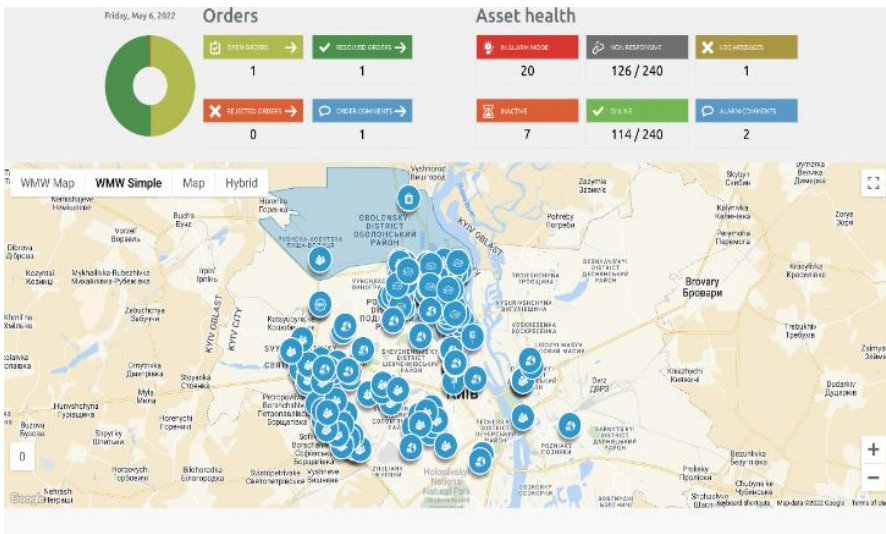
$$Y(a, c, d, e) = \sum_{j=1}^m y_j(a, c, d, e), \quad (2)$$

де:  $e$  – значення показника від давача, який перевищує ГДК.

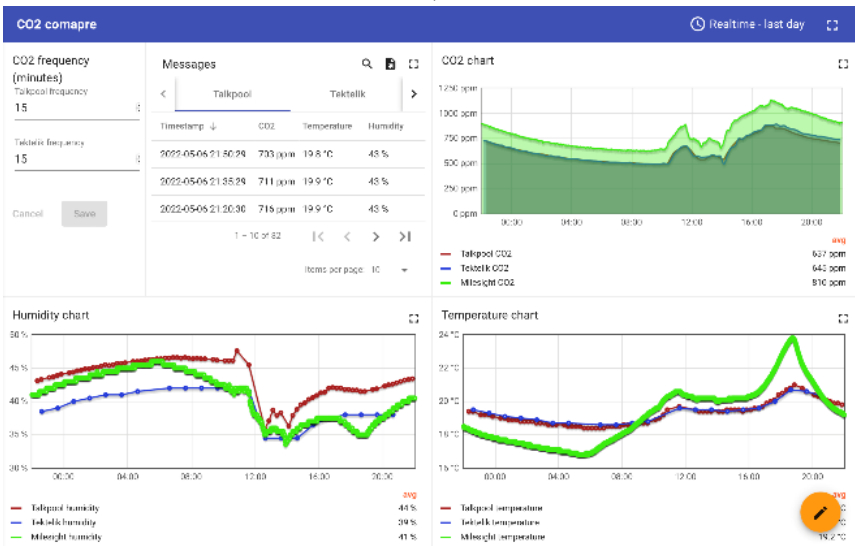
Відповідно, значення, що надходять від давача, можуть бути представлені у вигляді вибірки на множині записів про наявні результати спостереження, тобто,  $Q = \{ q \mid 1 \leq i \leq l \}$ :

$$Q(a, c, d, e) = \sum_{q=1}^l q_j(a, c, d, e). \tag{3}$$

Проте записів, описаних моделями (1)–(3), у базі даних може бути велика кількість по всьому місту, як це реалізовано на прикладі системи моніторингу стану довкілля у Києві (рис. 1, а). Крім того, від кожного давача у визначений момент часу надходять дані, які фіксують окремі параметри, що досліджуються (рис. 1, б), збільшуючи міру інформаційної ентропії [15].



а)



б)

Рис. 1. Система моніторингу стану довкілля м. Києва: а – розташування давачів інформації; б – фіксація результатів, що надходять від давачів

У цьому випадку мірою невизначеності інформації  $E$ , що надходить до сервера на обробку, може виступати показник відношення загальної суми неповних записів у базі даних про ресурси, НРП та показники стану довкілля на визначений момент часу, до ідеально повної бази даних:

$$E(x, y, q) = (\sum_{i=1}^n x'_i + \sum_{j=1}^m y'_j + \sum_{q=1}^l q'_j) / \sum_{i=1}^n xyq, \quad (4)$$

що підсумовуються по означених множинах записів  $I = \{ i | 1 \leq i \leq n \}$ ,  $J = \{ j | 1 \leq j \leq m \}$ ,  $Q = \{ q | 1 \leq q \leq l \}$ . Якщо  $E(x, y, q) \rightarrow 0$ , то виникає проблема невизначеності знань про поточний стан об'єкта і необхідно сформулювати додатковий пул інформації шляхом відправки запиту до давача (додаткове опитування давача). При  $E(x, y, q) \rightarrow 1$  підвищується визначеність і наявної інформації є достатньо, проте додатковий пул інформації формується за необхідністю. У разі  $E(x, y, q) = 1$  існує достатня кількість інформації про стан об'єкта. У цьому разі додаткових опитувань давачів не відбувається і використовується наявна інформація про стан об'єкта спостереження. Наявний пул після використання не зберігається. Проте, за наведеним підходом інформацію слід вичленувати, обробити та представити таким чином, щоб вона була достовірною, точною і не призводила до дублювання чи повторів [16], збільшуючи, тим самим, міру ентропії.

### Застосування інформаційної згортки

Припустимо, що для задач контролю необхідно зробити вибірку даних, що характеризують стан повітря за обмежений період часу (доба, тиждень, місяць). Ця вибірка повинна утримувати змістовні дані, що характеризують стан повітря по районах, середні та максимальні показники по місту в цілому, а також порівняти дані з обраними аналогічними періодами та надати інформацію про результати вимірів за локаціями давачів.

Сервіс-орієнтована мережа передає інформацію від давачів через рівні проміжки часу за замовчанням. За необхідності, як було зазначено вище, використовується опитування давачів для підтвердження чи спростування інформації. Орієнтуючись на наявні записи у базі даних протягом доби, можна отримати інформацію від ІТ щодо безпеки повітря в місті:  $F^i_{міста} = f_{IT}(x, y, q)$ . Тобто, функція безпеки цифрового міста на деякий момент часу є функцією системи надати вибірку точної інформації про забруднювачі ( $X$ ), протоколи роботи ( $Y$ ) та дані від давачів ( $Q$ ), що розташовані в різних локаціях мегаполісу. Виходячи із зазначеного, поточний стан системи, що підлягає моніторингу ( $X_n; Y_n; Q_n$ ), можна представити у вигляді символічної матричної форми (рис. 2), де об'єкт спостереження (у даному випадку – стан повітря в місті) характеризується з трьох точок зору:

- а) ( $X_o, Y_o, Q_o$ ) – з точки зору санітарних нормативів та ГДК;
- б) ( $X_I, Y_I, Q_I$ ) – за результатами виміру на конкретний момент часу;
- в) ( $X_n, Y_n, Q_n$ ) – з точки зору поточних значень за визначений період (доба, тиждень, місяць).



Рис. 2. Матрична форма представлення інформаційної згортки про стан повітря в місті

Системною вимогою для ступеня деталізації та агрегації інформації інформаційної згортки у наведеному випадку (рис. 2) буде вимога щодо відображення пов'язаної інформації щодо повітря по місту в цілому та за окремими районами, завдяки чому можна провести порівняння з візуалізацією результатів.

В процесі функціонування міста значення позицій матриці (стан повітря) буде коригуватися за даними моніторингу. Таким чином, первинні дані моніторингу за допомогою символічної матричної форми їх відображення перетворюються на візуальну модель за окремими параметрами.

Когнітивне навантаження запропонованої матричної символічної форми полягає в універсальності, яка дає можливість порівнювати різнопланові напрямки діяльності підсистем однієї системи, за якою здійснюється моніторинг роботи. Наприклад, можна побудувати матричну згортку за піковими навантаженнями, коли повітря в місті починає перевищувати встановлені ГДК, або зробити вибірку за локаціями встановлених давачів і оцінити навантаження на район від забруднюючих викидів. Вибір відносних одиниць виміру показників ситуації ( $X, Y, Q$ ) дає можливість порівнювати ситуацію не просто стану повітря по районах міста, а у різнопланових базових процесах функціонування мегаполісу, як-то завантаження транспортних розв'язок або робота промислових підприємств.

### Практична реалізація методу обробки інформації за допомогою згортки

Отримання та подальша обробка даних від давачів, підключених до сервіс-орієнтованої мережі LoRaWAN, передбачає інтеграцію і взаємодію низки незалежних програмно-апаратних комплексів, сервісів, систем, програмного забезпечення. Їх мета – реалізація автоматизованих сценаріїв та надання подальшого використання інтеграцій через опис способів взаємодії (API) та програмного управління апаратними компонентами міської інфраструктури.

Щоб побудувати на цій основі сервіс обробки інформації за допомогою згортки, можна застосувати правило рекурсійного копіювання, як це

використовується в деяких мовах програмування [17]. Застосування рекурсії обумовлено тим, що технологія змін при обробці інформації в послідовності процедур цієї моделі є за структурою та змістом алгоритмом, до якого можливо застосувати деякі правила та методи [18] і адаптувати алгоритм за підходом Тюрінга [19]. Так, з огляду на залежності (1)–(3), представлено трансформується у модель (4), яка визначає правило виклику рекурсивних копій для складних процедур виконання згортки шляхом трансформації списків чи кортежів інформації, які пов'яжуть в собі представлення події за низкою показників з врахуванням періодів, або параметрів на різних часових інтервалах, що характеризують стан об'єкта спостереження. Щоправда, подібна модель може створити системну затримку інформації (Т) в кожному контурі вибору необхідної інформації для інформаційної згортки:

$$T_n = T_3 + (T_2 + T_1) n, \tag{5}$$

де:  $T_{1,2,3}$  – ознаки часового контуру вибірки,  
 $n$  – число рівнів ієрархії інформації (даних, що необхідні для формування згортки).

Описаний метод був реалізований в інформаційно-телекомунікаційній системі «Платформа великих даних» шляхом створення сервісу представлення аналітики щодо екологічного стану в місті та відображення у модулі «Інформаційні панелі» підсистеми бізнес-аналітики у вигляді дашбордів. Під дашбордом в даній роботі розуміється вебдокумент, який дозволяє лаконічно представити дані за вибіркою з інфографікою та короткими звітами та порівняннями. Основною метою для впровадження у практику зазначеного методу було забезпечення збереження всіх даних, що надходять у сховище ІТС від давачів інформації, та обробка даних від екологічних сенсорів Oizom Polludrone та Talkpool OY1210 зі збереженням та візуалізацією.

Функціональні елементи інтеграції окремих пристроїв, від яких збиралася інформація для наступного формування інформаційної згортки, наведені на рис. 3.

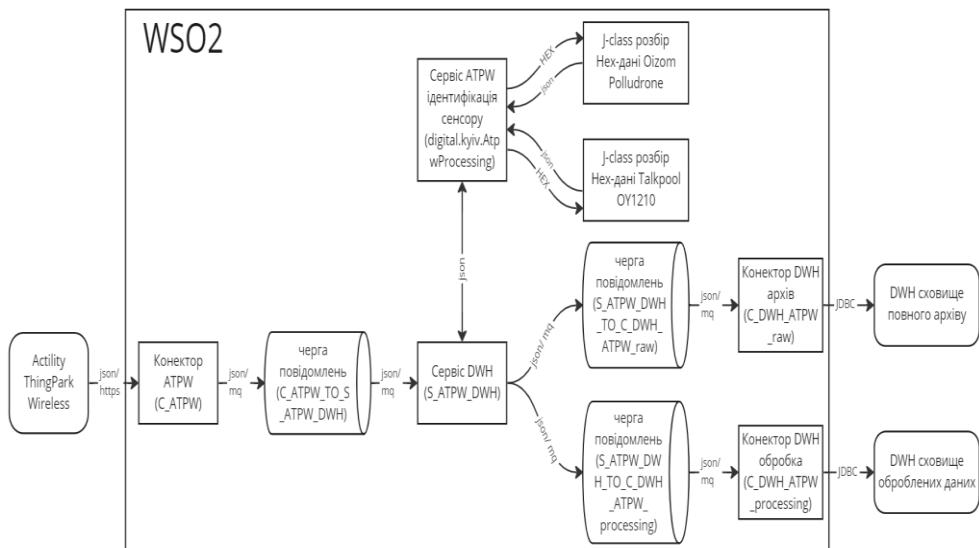


Рис. 3. Елементи інтеграції ІТС «Платформа великих даних»

Складовими частинами інтеграційної схеми (рис. 3) виступили:

- IC Actility ThingPark Wireless – джерело даних (давачі інформації);
- конектор ATPW (C\_ATPW) – забезпечує прийом даних від IC ATPW та збереження у внутрішній черзі повідомлень C\_ATPW\_TO\_S\_ATPW\_DWH для подальшої обробки за розробленим методом;
- черга повідомлень C\_ATPW\_TO\_S\_ATPW\_DWH – зберігає вхідні повідомлення для подальшої їх обробки;
- сервіс DWH (S\_ATPW\_DWH) – призначений для передачі необроблених даних для користувача DWH та підготовки оброблених даних для користувача DWH та їх збереження у внутрішніх чергах S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_raw та S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_processing;
- сервіс ATPW ідентифікація сенсора (digital.kyiv.ATPWProcessing) – призначений для визначення типу сенсора за його унікальним ідентифікатором та для розбору закодованих в HEX-форматі даних від сенсорів Oizom Polludrone та Talkpool OY1210;
- черга повідомлень S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_raw – зберігає необроблені дані для користувача DWH;
- черга повідомлень S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_processing – зберігає оброблені дані для користувачів DWH;
- конектор DWH архіву (C\_DWH\_ATPW\_raw) – призначений для передачі повідомлень з черги повідомлень S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_raw користувачу DWH автоматично при появі повідомлення у черзі. Дані зберігаються в таблиці необроблених даних;
- конектор DWH обробки (C\_DWH\_ATPW\_processing) – призначений для передачі повідомлень з черги повідомлень S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_processing користувачу DWH автоматично при появі повідомлення у черзі. Дані зберігаються в таблиці оброблених даних;
- сховище даних DWH – утримує кінцеву згортку обробленої інформації, яка візуалізована для кінцевого користувача на дашборді.

Безпосередньо процес обробки інформації про стан довкілля, яка отримується через сервіс-орієнтовану мережу, відбувається за наступним алгоритмом (див. рис. 3):

- 1) отримуються та обробляються дані з черги повідомлень C\_ATPW\_TO\_S\_ATPW\_DWH;
- 2) надсилається отримане повідомлення без обробки до черги повідомлень S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_raw;
- 3) DWH звертається до сервісу ATPW щодо ідентифікації давача інформації і передає йому отримане повідомлення без обробки;
- 4) від сервісу ATPW отримується відповідь про ідентифікацію сенсора згідно зі стандартним протоколом опису оброблених даних ATPW;
- 5) в разі отримання типу сенсора «unknown» обробка даних припиняється;
- 6) в разі отримання помилки, сервіс вносить інформацію про помилку в систему логування і обробка даних припиняється;
- 7) в разі отримання типу сенсора «eco» сервіс надсилає дані до черги повідомлень S\_ATPW\_DWH\_TO\_C\_DWH\_ATPW\_processing;
- 8) після перевірки кроків 5 – 7 сценарій переходить до обробки наступного повідомлення у черзі повідомлень C\_ATPW\_TO\_S\_ATPW\_DWH.

По закінченні циклу обробки повідомлень алгоритм переходить до стадії формування згортки, яка передається до тимчасово виділеної комірки у сховищі даних DWH. У підсумку інформаційна згортка візуалізується на дашборді (рис. 4).

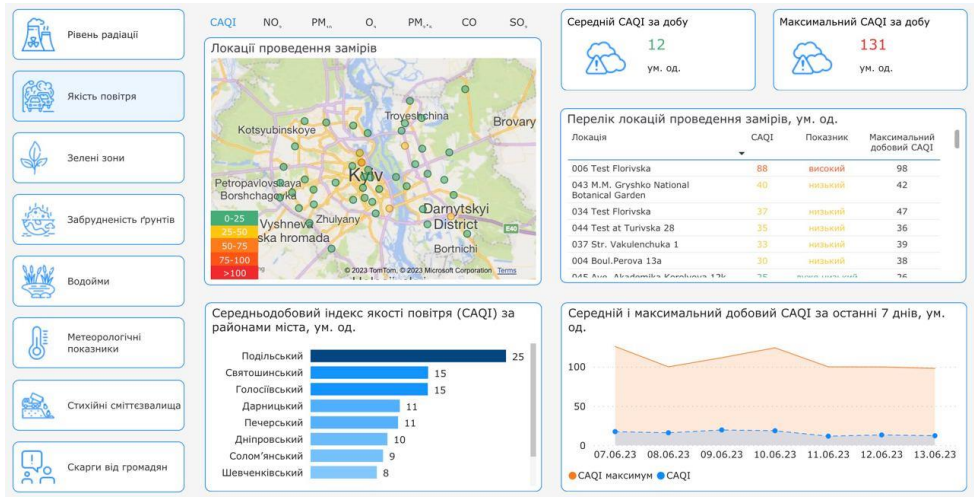


Рис. 4. Візуалізація отриманої інформаційної згортки на прикладі даних про стан повітря в м. Київ

Однією з особливостей розробленого сервісу є визначення приналежності дачача інформації до типу «есо», що відбувається на основі DevEUI сенсора. Це є унікальний ідентифікатор для пристрою в мережі LoRaWAN, подібний до MAC-адреси для пристрою TCP/IP. Завдяки чому чітко визначається локація дачача та виключається дублювання чи втрата даних в загальному масиві записів у базі даних. Для решти сенсорів системи, що не задіяні в моніторингу повітря, встановлюється тип «unknown».

Для «есо»-сенсорів сервіс звертається до відповідного Java-класу об'єктів у ІТС «Платформа великих даних» в залежності від виробника дачача, який проводить розбір HEX-даних (спеціальний формат файлу, що надає дані у текстовому вигляді). Java-клас отримує запит у форматі згідно з прийнятим протоколом опису даних для ATPW. Далі вхідні дані приводяться до формату, необхідного для обробки.

## Висновки

В роботі представлений метод обробки інформації про стан довкілля на основі даних, отриманих від дачачів, що під'єднані до сервіс-орієнтованої мережі на базі технології LoRaWAN. Метод реалізований в інформаційно-телекомунікаційній системі «Платформа великих даних» шляхом створення сервісу представлення аналітики щодо екологічного стану в місті та відображення у модулі «Інформаційні панелі» підсистеми бізнес-аналітики у вигляді дашбордів. Сутність методу складає створення інформаційної згортки, де відбувається вичленування інформації за рівнями в залежності від запиту кінцевого користувача. Отримана згортка не зберігається, оскільки первинна інформація залишається в базі даних системи і може бути використана за наступними запитами для аналітики чи порівняння.

Зазначене може бути використане в системах, що працюють з великими даними, з метою контролю поточного стану обробки інформації, створення вибірок для проміжних розрахунків, статистичних досліджень та узагальнень стану процесів, дія яких не завершена.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Musa S. (2018). Smart Cities-A Road Map for Development. IEEE Potentials. 37 (2): 19–23. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2566099>
2. Gerhart J. Home Automation & Wiring. McGraw-Hill/TAB Electronics, 1999. P. 322. ISBN 978-0-07-024674-4.
3. Acharjya, D.P.; Geetha, M.K., eds. (2017). Internet of Things: Novel Advances and Envisioned Applications. Springer. p. 311. ISBN 9783319534725.
4. Bell M. (2010). SOA Modeling Patterns for Service-Oriented Discovery and Analysis. Wiley & Sons. p. 390. ISBN 978-0-470-48197-4.
5. Davidson J. D.; Coward D. (1999). Java Servlet Specification ("Specification") Version: 2.2 Final Release. Sun Microsystems. pp. 43–46.
6. Thomas J.; Traukina A. (2018). Industrial Internet Application Development: Simplify IIoT development using the elasticity of Public Cloud and Native Cloud Services. Packt Publishing. p. 25. ISBN 978-1788298599.
7. Технології інтернету речей. Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. Для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології», спеціалізація «Інформаційне забезпечення робототехнічних систем» / Б. Ю. Жураковський, І. О. Зенів; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,5 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 271 с.
8. Stephenson, W. D. (2018). The Future Is Smart: how your company can capitalize on the Internet of Things - and win in a connected economy. HarperCollins Leadership. p. 250. ISBN 9780814439777.
9. Енергоефективність в муніципальному секторі. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування / А.Максимов, І.Вахович, Т.Гутніченко, П.Бабічева, Н.Вакуленко, Н.Ігольнікова, Т.Цифра, О.Молодід, О.Молодід, О.Беленкова, Ю.Ячменьова, Ю.Дорошук, А.Скрипник, А.Ваколук, В.Бойко, М.Сегедій, Д.Вахович / Асоціація міст України – К., ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2015. –184 с.
10. Гойко А. Ф. Ефективність інвестування реконструкції і технічного переоснащення діючих підприємств / Гойко А. Ф // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин: зб. наук.праць. – К.: КДТУБА, 2009. – С. 64–74.
11. Енергетична стратегія України на період до 2030 року [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://eircenter.com/images/Strategiya.pdf>
12. Batty M.; et al. (2012). Smart Cities of the Future. European Physical Journal ST. 214: 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
13. Raza U., Kulkarni P., Sooriyabandara M., Low power wide area networks: an overview, IEEE Commun. Surv. Tutor. 19 (2) (2017) 855–873, <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
14. Kircher M.; Prashant J. (2002). Pooling Pattern. EuroPLoP. Germany. <http://www.kircher-schwanninger.de/michael/publications/Pooling.pdf>
15. Spellerberg, Ian F.; Fedor, Peter J. (2003). A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon–Wiener' Index. Global Ecology and Biogeography. 12 (3): 177–179. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00015.x>
16. Chakrabarti, C. G., Indranil C. Shannon entropy: axiomatic characterization and application. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences 2005.17 (2005): 2847–2854. <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0511171.pdf>



17. Pinker S.; Jackendoff R. (2005). The faculty of language: What's so special about it?. *Cognition*. 95 (2): 201–236. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.08.004>
18. Довгий С. О., Бідюк П. І., Трофимчук О. М., Савенков О. І. Методи прогнозування в системах підтримки прийняття рішень. – К.: Азимут-Україна. – 2011. – 608 с.
19. Hodges A. (2012). *Alan Turing: The Enigma* (The Centenary ed.). Princeton University Press. ISBN 978-0-691-15564-7.

Стаття надійшла до редакції 16.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 17.11.2023

## REFERENCES

1. Musa, S. (2018). Smart Cities-A Road Map for Development. *IEEE Potentials*, 37 (2), 19–23. <https://doi.org/10.1109/MPOT.2016.2566099>
2. Gerhart, J. (1999). *Home Automation & Wiring*. McGraw-Hill/TAB Electronics. ISBN 978-0-07-024674-4.
3. Acharjya, D. P., & Geetha, M. K. (Eds.). (2017). *Internet of things: Novel advances and envisioned applications*. Springer International Publishing. ISBN 9783319534725.
4. Bell, M. (2010). *SOA Modeling Patterns for Service-Oriented Discovery and Analysis*. Wiley & Sons. ISBN 978-0-470-48197-4.
5. Davidson, J. D., & Coward, D. (1999). *Java Servlet Specification ("Specification") Version: 2.2 Final Release*. Sun Microsystems. pp. 43–46.
6. Thomas, J., Traukina, A. (2018). *Industrial Internet Application Development: Simplify IIoT development using the elasticity of Public Cloud and Native Cloud Services*. Packt Publishing. ISBN 978-1788298599.
7. Zhurakovskiy, B. Yu., & Zeniv, I.O. (2021). *Tekhnolohii internetu rechei. Navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho [in Ukrainian].
8. Stephenson, W. D. (2018). *The Future Is Smart: how your company can capitalize on the Internet of Things – and win in a connected economy*. HarperCollins Leadership.
9. Maksymov, A., Vakhovych, I., Hutnichenko, T., Babicheva, P., Vakulenko, N., Iholnikova, N. et al. (2015). *Enerhoefektyvnist v munitsypalnomy sektori. Navchalnyi posibnyk dlia posadovykh osib mistsevoho samovriaduvannia. Asotsiatsiia mist Ukrainy*. Kyiv: TOV «Pidpriumstvo «VI EN EI» [in Ukrainian].
10. Hoiko, A. F. (2009). *Efektyvnist investuvannia rekonstruktsii i tekhnichnoho pereosnashchennia diiuchykh pidpriumstv. Shliakhy pidvyschennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn: zb. nauk.prats, 64-74* [in Ukrainian].
11. *Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2030 roku*. Retrieved from <http://eircenter.com/images/Strategiya.pdf>
12. Batty, M. et al. (2012). Smart Cities of the Future. *European Physical Journal ST*, 214, 481–518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
13. Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: an overview. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 19 (2), 855–873, <http://dx.doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
14. Kircher, M., & Prashant, J. (2002). *Pooling Pattern*. EuroPLoP. Germany. <http://www.kircher-schwanninger.de/michael/publications/Pooling.pdf>
15. Spellerberg, Ian F., & Fedor, Peter J. (2003). A tribute to Claude Shannon (1916–2001) and a plea for more rigorous use of species richness, species diversity and the 'Shannon–Wiener' Index. *Global Ecology and Biogeography*, 12 (3), 177–179. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00015.x>
16. Chakrabarti, C. G., & Indranil, C. (2005). Shannon entropy: axiomatic characterization and application. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2005.17: 2847-2854. <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/0511171.pdf>

17. Pinker, S., & Jackendoff, R. (2005). The faculty of language: What's so special about it?. *Cognition*, 95 (2), 201–236. doi:10.1016/j.cognition.2004.08.004
18. Dovhyi, S. O., Bidiuk, P. I., Trofymchuk, O. M., & Savenkov, O. I. (2011). *Metody prohnozuvannia v systemakh pidtrymky pryiniattia rishen*. Kyiv: Azymut-Ukraina [in Ukrainian].
19. Hodges, A. (2012). *Alan Turing: The Enigma (The Centenary ed.)*. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-15564-7.

*The article was received 16.08.2023 and was accepted after revision 17.11.2023*

**Трофимчук Олександр Миколайович**

член-кореспондент Національної академії наук України, доктор технічних наук, професор, Директор Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3358-6274>

**Іцкович Вікторія Євгенівна**

доктор філософії, молодший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1351-8178>

УДК 551.46.08

**Oleksii Lebid<sup>1</sup>**, Doctor of Engineering Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Science

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

**Viacheslav Okhariev<sup>1</sup>**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

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

**Sergiy Fedoseienkov<sup>2</sup>**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Deputy Director for Science

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9576-2977> *e-mail*: 22lex22s@ukr.net

**Oleksiy Shundel<sup>2</sup>**, Candidate of Physics and Mathematics Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3076-9553> *e-mail*: lixyta666@gmail.com

**Roman Telychko<sup>1</sup>**, Leading Engineer

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-7919> *e-mail*: roman.telychko@gmail.com

**Oleg Klymenkov<sup>1</sup>**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> *e-mail*: oleg@klymenkov.com

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

<sup>2</sup>State Institution "Scientific Hydrophysical Center of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

## **GEOINFORMATION TECHNOLOGIES OF ENVIRONMENTAL MONITORING IN THE BLACK SEA AFTER KAKHOVSKA HYDROELECTRIC POWER PLANT DISASTER**

***Abstract.** The article offers the implementation of the proposed approach to the assessment and forecasting of indicators of environmental monitoring of marine water areas. It is an important component of the process of information support for decision-making in the field of environmental safety. The south-western part of the Black Sea water area was as the test region, was suffered from a negative environmental impact of a terrorist attack by Russian armed forces in the area of the Kakhovskaya hydroelectric power plant. The attack caused the destruction of the facility and the leakage of water from the Kakhovska reservoir with catastrophic consequences for the Northern Black Sea region. The authors proposed to apply a combination of data from contact monitoring of hydrophysical indicators, remote sensing data and mathematical modeling based on geospatial data in the specialized geo-information software environment Delft3D Mesh Suite within the framework of the developed software component. The component provides for the automation of data collection and processing processes followed by modeling and forecasting and visualization hydrophysical processes in the water area. On the basis of the applied information technologies, an analysis was carried out and geomodels were built, describing the hydrophysical situation in the northwestern part of the Black Sea both before the disaster and after certain time intervals after it, like a week and a month). The dynamics of seawater salinity as an important indicator of the potential increase of biogenic substances in the composition of seawater, as well as the nature of the circulation of water masses, which can provide additional information about the features of the geographical distribution of pollutants in the area affected by the*

*disaster, were analyzed. The need for further real-time ecological monitoring of the consequences of the disaster, especially in the most affected parts of the water area near the northwestern coast of the Black Sea and on the coastal areas of the land in this region with the implementation of the proposed information technologies, is substantiated.*

**Keywords:** Black sea water area; Kakhovska hydroelectric power station; man-made impact; hydrophysic situation; remote sensing; geographic information technology.

**О.Г. Лебідь<sup>1</sup>, В.О. Охарев<sup>1</sup>, С.Г. Федосєєнков<sup>2</sup>, О.І. Шундель<sup>2</sup>, Р.І. Телічко<sup>1</sup>, О.А. Клименков<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>Державна установа «Науковий гідрофізичний центр Національної академії наук України», м. Київ, Україна

## **ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ АКВАТОРІЇ ЧОРНОГО МОРЯ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ КАХОВСЬКОЇ ГЕС**

**Анотація.** В статті пропонується приклад реалізації запропонованого підходу до оцінки та прогнозування показників екологічного моніторингу морських акваторій, що є важливою складовою процесу інформаційної підтримки прийняття рішень в сфері екологічної безпеки. В якості регіону дослідження взято південно-західну частину акваторії Чорного моря, що зазнала негативного екологічного впливу внаслідок терористичної атаки збройних формувань РФ в районі Каховської ГЕС, що викликало руйнування самого об'єкта та витік води з Каховського водосховища із катастрофічними наслідками для регіону Північного Причорномор'я. Авторами запропоновано застосувати поєднання даних контактного моніторингу гідрофізичних показників, дані космічної зйомки та математичне моделювання на основі геопросторових даних у спеціалізованому геоінформаційному програмному середовищі Delft3D Mesh Suite в рамках розробленої програмної складової, що передбачає автоматизацію процесів збору та обробки даних із подальшим проведенням моделювання, прогнозування та візуалізації гідрофізичних процесів в акваторії. На основі застосованих інформаційних технологій проведено аналіз та побудовано геомоделі, що описують гідрофізичну обстановку в північно-західній частині Чорного моря як перед катастрофою, так і через певні проміжки часу після неї (тиждень, місяць). Проаналізовано динаміку солоності морської води як важливого індикатора потенційного збільшення біогенних речовин в складі морської води, а також характер циркуляції водних мас, що може надати додаткову інформацію про особливості географічного розподілу забруднюючих речовин в зоні впливу катастрофи. Обґрунтовано необхідність подальшого екологічного моніторингу наслідків катастрофи в режимі реального часу, особливо в найбільш постраждалих частинах акваторії біля північно-західного узбережжя Чорного моря та на приморських ділянках суходолу в цьому регіоні із впровадженням запропонованих інформаційних технологій.

**Ключові слова:** акваторія Чорного моря; Каховська ГЕС; техногенне забруднення; гідрофізична обстановка; космічний моніторинг; геоінформаційні технології.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>

## Вступ

Терористична атака збройних формувань Російської Федерації 6 червня 2023 року, наслідками якої стало руйнування Каховської гідроелектростанції та фактичне зникнення Каховського водосховища, має фундаментальні наслідки не лише для екосистеми Дніпра та прилеглих територій, а також для екологічної та гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря, надто в її північно-західній частині. Через русло Дніпра та Дніпро-Бузький лиман до чорноморської акваторії потрапили значні об'єми екологічно небезпечних речовин, що є продуктами господарської діяльності в регіоні Нижнього Подніпров'я. Крім того, фактором додаткової екологічної напруги є разове потрапляння в Чорне море величезних об'ємів прісної води внаслідок руйнування дамби Каховського водосховища. Залпове опріснення призводить до змін гідрохімічного та гідробіологічного складу морської води, збільшує масштаби евтрофікаційних процесів, що, відповідно, впливає на біорізноманіття та функціонування морських екосистем в цілому.

Розвиток та наслідки екологічних катастроф подібного масштабу мають підлягати оперативному моніторингу, оптимально – максимально наближеному до режиму реального часу. Оперативний відбір проб води в зоні екологічного лиха може бути ускладнений форс-мажорними обставинами, зокрема, як і у випадку катастрофи на Каховській ГЕС, коли значна частина стаціонарних пунктів гідрологічного моніторингу в гирлі Дніпра та Чорноморській акваторії знаходиться на окупованих територіях, або ж у зоні активних бойових дій. Відповідно, застосування дистанційних методів моніторингу докільля стає не просто бажаним, а критично необхідним для оперативної оцінки ситуації.

Оцінка та прогнозування наслідків надзвичайних екологічних ситуацій потребує застосування сучасних інформаційних технологій, що базуються на обробці геопросторових даних [1, 2]. Авторами пропонується використати розроблене програмне середовище автоматичного пошуку та відбору визначеного переліку гідрофізичних даних для оцінки та прогнозування екологічної ситуації, що базується на поєднанні даних дистанційного та доступних наразі пунктів контактного моніторингу північно-західної частини акваторії Чорного моря.

**Мета роботи.** Удосконалення розробленого програмного середовища автоматичного пошуку та відбору визначеного переліку гідрофізичних даних та автоматичного їх введення в спеціалізоване програмне забезпечення Delft 3D Mesh Suite із подальшою побудовою 10-добових прогнозів гідрофізичних полів та його впровадження в задачах оцінки та прогнозування надзвичайної екологічної ситуації в північно-західній частині акваторії Чорного моря, що виникла внаслідок руйнування Каховської ГЕС.

## Виклад основного матеріалу дослідження

Швидке поширення техногенного забруднення в акваторії Чорного моря почалося вже через добу після підриву Каховської гідроелектростанції та продовжувалося близько місяця. Супутникові знімки та результати наземного екологічного моніторингу (зокрема, дані Українського наукового центру екології моря) показали стрімке збільшення концентрацій біогенних речовин в

період до 17.06.23 та падіння солоності більш ніж у 2 рази. Гранично допустимі концентрації були перевищені по вмісту нафтопродуктів та важких металів (кадмій, цинк тощо) по лінії узбережжя від Дніпро-Бузького лиману до м. Одеса [3].

Космічні знімки, представлені нижче, ілюструють наслідки катастрофи для акваторії як в статистиці, так і в динаміці.

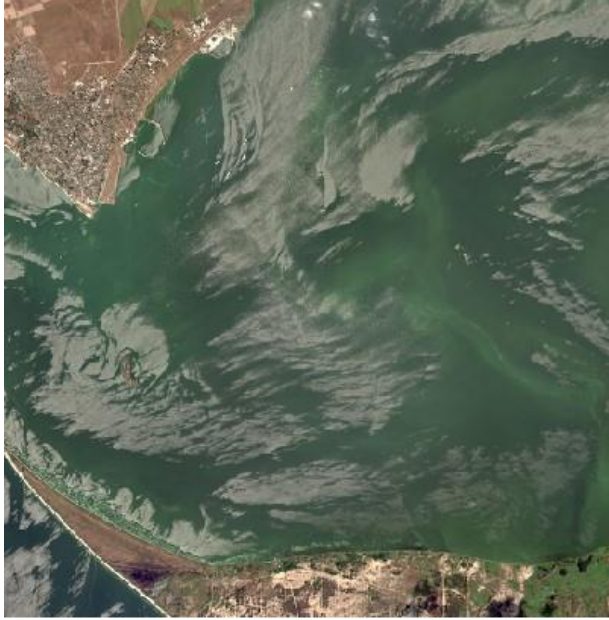


Рис. 1. Супутникове зображення акваторії Дніпро-Бузького лиману (естуарій Дніпра) в районі м. Очаків від 24 липня 2023 р. (джерело – Maxar Technologies)



Рис. 2. Накладені супутникові зображення акваторії Одеської бухти від 9 червня 2022 р. (верхній) та 25 червня 2023 р. (нижній знімок) (джерело – Maxar Technologies)

Дані зображення в оптичному діапазоні дозволяють чітко зафіксувати збільшення масштабів цвітіння у морській воді внаслідок її опріснення (області акваторії зеленого відтінку). Для Одеської бухти можна порівняти зображення за червень 2022 та, відповідно, 2023 р., де також фіксується значне збільшення концентрації біогенних речовин у воді. Аналогічні тенденції можна спостерігати на супутникових зображеннях північно-західної частини акваторії в цілому (рис. 3 а-б)



а)



б)

Рис. 3. Зображення північно-західної частини акваторії Чорного моря: а) 18.06.23; б) 23.06.23 (космічний апарат SENTINEL-2, джерело – Copernicus Dataspace Ecosystem)

Для оцінки та прогнозування динаміки екологічної ситуації пропонується розроблений авторами підхід, заснований на застосуванні геоінформаційних технологій для автоматизації збору, аналізу та прогнозування шляхом обробки великих масивів гідрофізичних даних. З цією метою було розроблено та апробовано програмне середовище, що забезпечує автоматизацію процесу збору визначеного масиву даних, їх отримання та аналізу шляхом математичного моделювання та прогнозування у спеціалізованому програмному забезпеченні Delft 3D Mesh Suite розробки Deltares (Університет м. Делфт, Нідерланди). Детально технологія розробки програмної складової

описана авторами в роботі [4], деякі деталі концепції також представлені в роботах [5-7].

Масив гідрофізичних даних, що береться в обробку, має відповідати наступним вимогам:

- інформація, яка збирається, повинна бути кількісною. Це означає, що параметри повинні бути виміряні в числовому виразі, що дозволяє їх використовувати для математичного аналізу та моделювання;

- дані мають надходити на регулярній основі через рівні проміжки часу. Ця регулярність допомагає створити довгострокові часові ряди та визначити тенденції в гідрофізичних параметрах з плином часу;

- інформація має бути актуальною. Тобто час, який потрібно на збір та обробку даних, має бути мінімальним. Це важливо, особливо для ситуацій, коли гідрофізичні параметри можуть змінюватися швидко і впливати на безпеку чи природні ресурси [8];

- інформація має бути представлена у формі, яка найкраще відображає динаміку гідрофізичної обстановки та відповідає конкретним завданням, які ставляться перед користувачем прогновної моделі. Це може включати в себе графіки, картографічні дані або інші візуалізації.

Враховуючи ці вимоги, можна забезпечити збір інформації про гідрофізичну обстановку, яка буде корисною для наукових досліджень, прийняття рішень та прогнозування в області гідрології та управління водними ресурсами в надзвичайних ситуаціях.

Для вирішення поставлених задач запропонованими програмними засобами авторами вважається за оптимальне сформувати наступну вибірку гідрофізичних даних:

- гідрологічні: солоність, температура, рівень поверхні води;

- цифрова модель рельєфу акваторії, представлена у вигляді набору батиметричних величин;

- метеорологічні: швидкість вітру; атмосферний тиск; хмарність; вологість; температура повітря.

Перевірка якості отриманих даних полягає в оцінці достовірності інформації, зокрема, шляхом аналізу результатів вимірювань, підтверджених параметрів і контролю якості. Для оцінки достовірності даних проводиться ретельний аналіз набору даних, спрямований на виявлення будь-яких відхилень від очікуваних моделей чи тенденцій. Крім того, користувачі можуть порівнювати дані з іншими джерелами, щоб переконатися в їхній надійності. Сучасні методи оцінки якості даних включають використання аналітичних методів. Це допомагає виявити складні взаємозв'язки в даних та визначити їхню точність [9].

Для отримання океанографічних даних існують різні методи доставки, вибір яких залежить від конкретних потреб. Історичні дані можна завантажити масово, в той час як для оперативного моніторингу доступні API та потокові дані у реальному часі. Деякі авторитетні бази даних надають безкоштовний доступ до даних при реєстрації. У даній науково-технічній роботі використовується база даних проекту Copernicus як джерело оперативних, регулярних та повних оновлень океанографічних даних, зокрема, щодо акваторії Чорного моря. Це дозволяє забезпечити актуальну та достовірну інформацію для досліджень і наукових завдань.



Sorpenicus – це програма Європейського Союзу зі спостереження за Землею, яка координується та керується для Європейської Комісії Агентством Європейського Союзу з космічної програми у партнерстві з Європейським космічним агентством (ESA), державами-членами ЄС.

Проект спрямований на досягнення глобальної, безперервної, автономної, високоякісної широкомасштабної можливості спостереження Землі. Надання точної, своєчасної та легкодоступної інформації для, серед іншого, покращення управління навколишнім середовищем, розуміння та пом'якшення наслідків зміни клімату та забезпечення цивільної безпеки.

Мета полягає в тому, щоб використовувати величезну кількість глобальних даних із супутників і наземних, бортових і морських вимірювальних систем для отримання своєчасної та якісної інформації, послуг і знань, а також для забезпечення автономного та незалежного доступу до інформації у сферах навколишнього середовища та безпеки на глобальному рівні, щоб допомогти постачальникам послуг, державним органам влади та іншим міжнародним організаціям покращити якість життя громадян Європи. Іншими словами, він об'єднує всю інформацію, отриману екологічними супутниками Sorpenicus, повітряними та наземними станціями та датчиками, щоб отримати повну картину «здоров'я» Землі.

В складовій космічного моніторингу Sorpenicus використовує супутникові системи спостереження та відповідний наземний сегмент, призначений для збору і обробки даних про наземні, атмосферні та океанографічні параметри. В рамках цього компонента існують два типи супутникових місій: п'ять різних сімейств супутників ESA Sentinel, які здійснюють спостереження, та інші місії від різних космічних агентств, які також здійснюють свій внесок у збір даних. Наземна складова спостережень доповнює дані, отримані з космічних апаратів, і відіграє важливу роль у забезпеченні повноти та точності інформації.

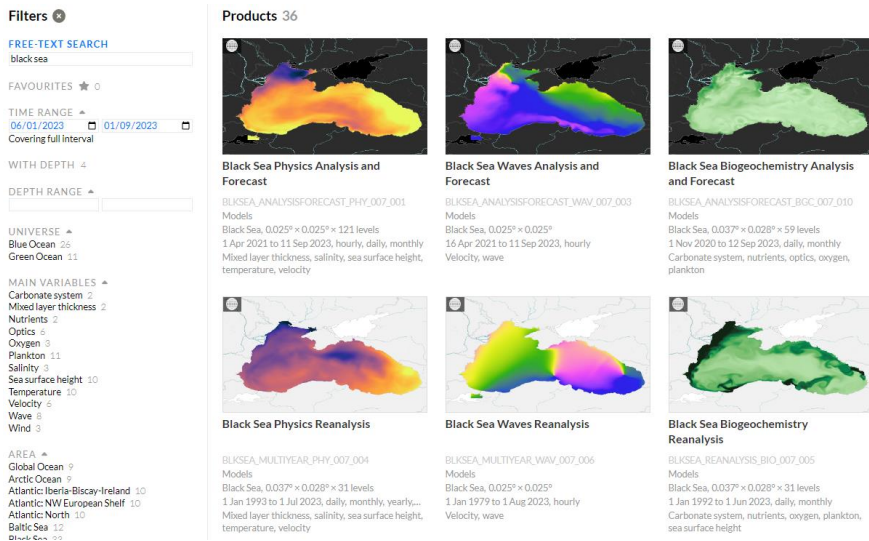


Рис. 4. Вибірка багатерічних даних Sorpenicus Marine для аналізу екологічної ситуації в акваторії Чорного моря (гідрофізичні та біохімічні дані)

Для коректного аналізу необхідні точні та оперативні метеорологічні дані, такі як швидкість вітру, атмосферний тиск, хмарність, вологість і температура

повітря. Прогнозування погоди є складною задачею, що вимагає математичного моделювання і високих вимог до програмної реалізації. У світі існує лише кілька авторитетних прогностичних моделей, таких як GFS, ECMWF, GFS, ICON-EU, METEOBLUE. В даній роботі використовувалась Global Forecast System (GFS) від Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США (NOAA). Це комплексна система чисельного прогнозування погоди, яка включає глобальну комп'ютерну модель та варіаційний аналіз, що виконується Національною службою погоди США (NWS). Математична модель GFS запускається чотири рази на день і генерує прогнози на 16 днів вперед, проте зі зменшеною просторовою роздільною здатністю після 10-го дня. Точність прогнозів зазвичай зменшується зі збільшенням проміжку часу (як це відбувається з будь-якою моделлю чисельного прогнозу погоди), і для довгострокових прогнозів лише більші шкали зберігають значний рівень точності. GFS є однією з найкращих синоптичних моделей для середньострокових прогнозів загального використання. Модель GFS має приблизну горизонтальну роздільну здатність 13 км для перших 16 днів прогнозування. Вона складається з 127 вертикальних шарів і охоплює мезопаузу (приблизно 80 км). Модель генерує прогнозні дані щогодини протягом перших 120 годин, кожні 3 години до 10-го дня і кожні 12 годин на 16-й день. Дані з GFS використовуються також для отримання статистичної інформації щодо вихідних даних моделі [10, 11].

Після збору необхідних даних наступним етапом є проведення аналізу та прогнозування ситуації в акваторії за обраним набором показників. Для вирішення задач моделювання та прогнозування гідрофізичних показників пропонується використання спеціалізованого програмного забезпечення. Для цього було обрано програмний пакет Delft 3D Mesh Suite розробки Deltares (Університет м. Делфт, Нідерланди). Delft3D є визнаним у світі open source-проектом для 3D-моделювання в задачах дослідження гідродинаміки, транспортування наносів, морфології та якості води.

Модель Delft3D складається з декількох модулів, кожен з яких відноситься до конкретної області, що цікавить.

Всі модулі динамічно пов'язані для обміну даними та результатами, які необхідні для спільного розрахунку. Модуль Delft3d-FLOW відповідає за гідродинаміку. За його допомогою можна розрахувати швидкість і напрямок течій, рівень води, солоність і температуру води, траєкторію руху домішок у воді тощо. У модулі Delft3D-WAVE відбувається розрахунок короткохвильового поширення (спільно використовуючи модель SWAN). D-Water Quality дозволяє розрахувати загальну якість води, Delft3D-SED – перенесення донних відкладень, а D-Waq PART моделює перенесення частинок та розлив нафти.

Так само в моделі є інструменти для обробки вихідних даних та результатів, генерації сітки, батиметрії, відкритих кордонів, споруд, перешкод та інших вхідних файлів. Підпрограма RGRFGRID дозволяє згенерувати розрахункову сітку та всі необхідні з нею файли.

Центральний модуль Delft3D-FLOW є багатовимірною гідродинамічною програмою симуляції, яка має можливість розрахунку нестационарного потоку та явища перенесення внаслідок припливного та метеорологічного впливу на криволінійній граничній сітці. Модуль Delft3D-FLOW заснований на рівняннях Нав'є-Стокса. Основні сфери застосування даного модуля:

- приливні та вітрові течії (тобто штормовий нагін);
- стратифіковані та щільнісні течії;
- моделювання течії в річках;
- моделювання в глибоких озерах та водосховищах;
- температурна стратифікація в озерах, морях та водоймах;
- перенесення розчиненої речовини та забруднюючих речовин;
- течії, викликані впливом хвиль;
- негідростатичні течії.

Для моделювання еволюції вітрових хвиль у прибережних ділянках, естуаріях, припливних територіях, озерах тощо використовується модель вітрового хвилювання третього покоління SWAN – Simulating Waves Nearshore, яка інтегрована в модуль Delft3D-WAVE. Він може працювати у комбінації з модулем Delft3D-FLOW, використовуючи паралельний розрахунок.

Модуль Delft3D-FLOW, заснований на методі кінцевих різниць, імітує двовимірні (опосередковані по глибині) або тривимірні нестационарні течії та явища перенесення, що виникають внаслідок припливних та метеорологічних явищ, а також неоднорідності полів температури та солоності. Модель потоку може використовуватися для прогнозування потоків у морях, прибережних районах, естуаріях, лагунах, річках та озерах.

У системі чисельного гідродинамічного моделювання DELFT3D-FLOW вирішуються нестационарні рівняння мілкої води (лінійні рівняння Сен-Венана) у двовимірному чи тривимірному просторі. Система рівнянь складається з горизонтальних рівнянь руху, рівняння нерозривності та рівнянь перенесення. Рівняння формуються на ортогональній криволінійній або рівновіддаленій розрахунковій сітці у метричних чи сферичних координатах.

Потік генерується припливними силами, напором вітру на вільній поверхні, градієнтами тиску (баротропними) та щільністю (бароклініними). Також включені рівняння витрати води.

Модуль Delft3D-FLOW включає математичні моделі, які враховують наступні фізичні параметри (рис. 5):

- градієнти вільної поверхні (баротропна складова);
- ефект обертання Землі (коефіцієнт Коріоліса);
- вода зі змінною щільністю (рівняння стану);
- бароклінна складова;
- перенос солі, тепла та інших складових;
- зміна напруги вітру на поверхні за простором та часом;
- зміна атмосферного тиску на поверхні за часом та простором;
- стік вод;
- теплообмін через вільну поверхню;
- випаровування та атмосферні опади;
- припливоутворюючі сили;
- бічна напруга на стінках;
- вплив хвиль;
- хвильова напруга та потоки мас;
- потоки через гідравлічні конструкції.

Отримані обчислення можна зобразити і перетворити в один зі зручних графічних форматів, таких як PNG або GeoTIFF, за допомогою модуля QUICKPLOT, який розроблено в середовищі MATLAB.

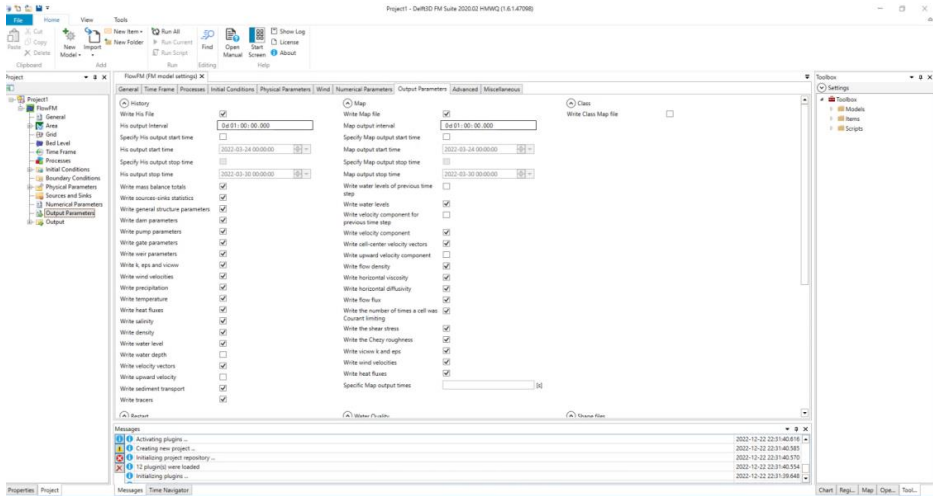


Рис. 5. Вікно налаштування параметрів моделі у Delft 3D (модуль FLOW)

Розроблена програмна складова (модуль) містить засоби [3] реалізації всього описаного процесу від збору даних до візуалізації результатів. Модуль забезпечує розміщення отриманих результатів в Банку океанографічних даних, що розміщений на береговому сервері Наукового гідрофізичного центру НАН України. Характеристики розробленого модуля дозволяють забезпечувати автоматизований режим роботи вищеперерахованих складових [3]. Модуль автоматично взаємодіє зі встановленим на сервері програмним забезпеченням Delft 3D Mesh Suite. Також автоматично генерується візуалізація результатів, з використанням модуля QUICKPLOT (який діє в середовищі MATLAB як частина Delft 3D Mesh Suite).

На рис. 6-9 представлено результати застосування представленого підходу до наведених інформаційних технологій в рамках розробленої програмної складової.

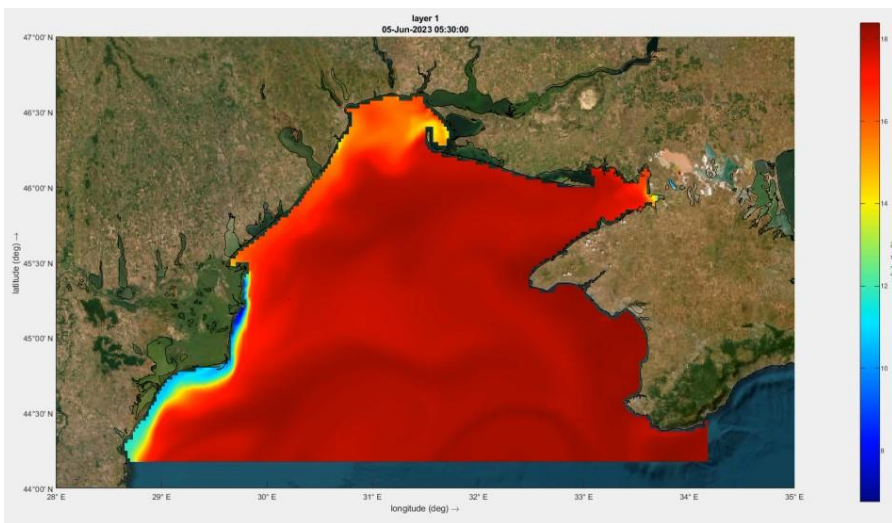


Рис. 6. Рівень солоності в північно-західній частині акваторії Чорного моря (5 червня 2023 р.)

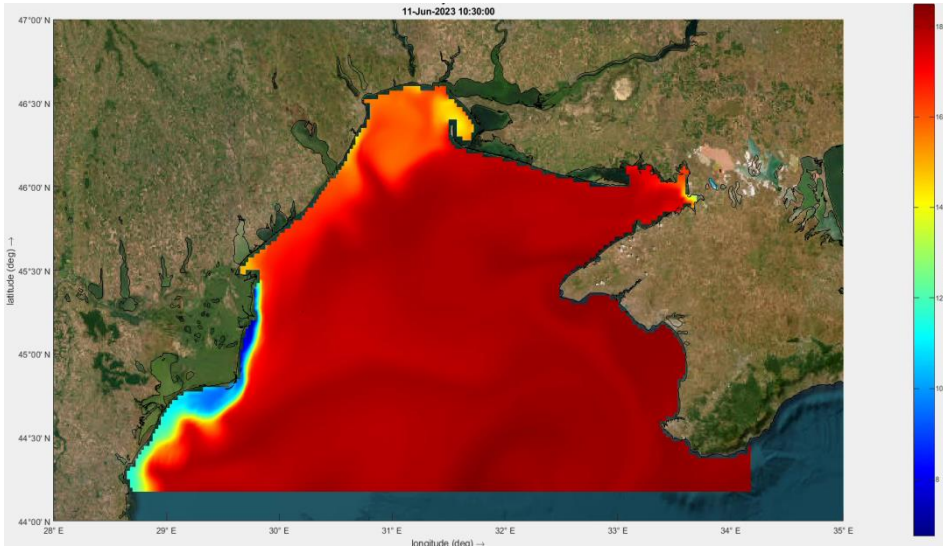


Рис. 7. Рівень солоності в північно-західній частині акваторії Чорного моря (11 червня 2023 р.)

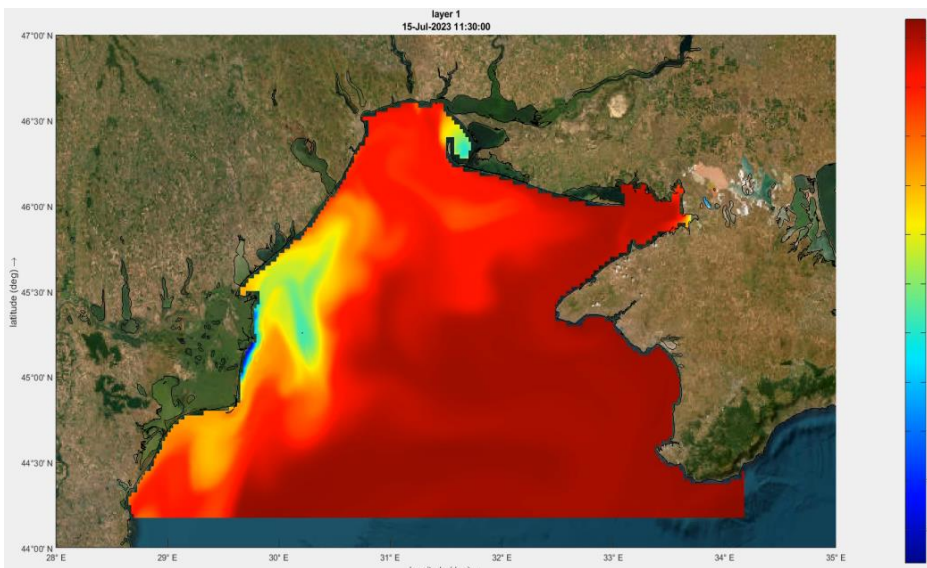


Рис. 8. Рівень солоності в північно-західній частині акваторії Чорного моря (15 липня 2023 р.)

Аналіз довгострокових даних показує короточасні зміни рівня солоності в акваторії біля естуарію Дніпра та в акваторії біля м. Одеса через 3-10 днів після руйнування дамби Каховської ГЕС. При цьому результати свідчать, що навіть одночасний викид величезних мас прісної води з Каховського водосховища у Чорне море не призвів до довгострокового зниження рівня солоності до показників, порівняних з природним чином опрісненою зоною акваторії в районі дельти Дунаю та о. Зміїний. Це може бути пов'язано як із фактором затоплення низинних територій Нижнього Подніпров'я, де «залишились» значні маси води з Каховського водосховища, так і з роботою функціонуючих

ГЕС Дніпровського каскаду, що оперативним чином припинили скид води одразу після катастрофи. Також сезонними факторами та роботою гідротехнічних споруд можна пояснити зниження солоності в зонах естуаріїв на рис. 8 (липень 2023 р.)

Отже, головною проблемою для екосистеми Чорного моря можна вважати не довгострокове зниження солоності, якого фактично не відбулося, а саме виник забруднюючих речовин антропогенного походження. Дані моніторингу за червень 2022 р. показали, що більша частина об'єму дніпровської води рухалась вузькою смугою уздовж південного узбережжя Одеської та Миколаївської областей. Також моделювання циркуляції водних мас, виконані в розробленому авторами програмному середовищі, показують напрям та швидкість руху води, що в цілому збігаються з такими висновками (рис. 9). Відповідно, саме прибережна зона акваторії та приморська смуга суходолу Миколаївської та Одеської областей є найбільш постраждалими від техногенного забруднення внаслідок руйнування Каховської гідроелектростанції.

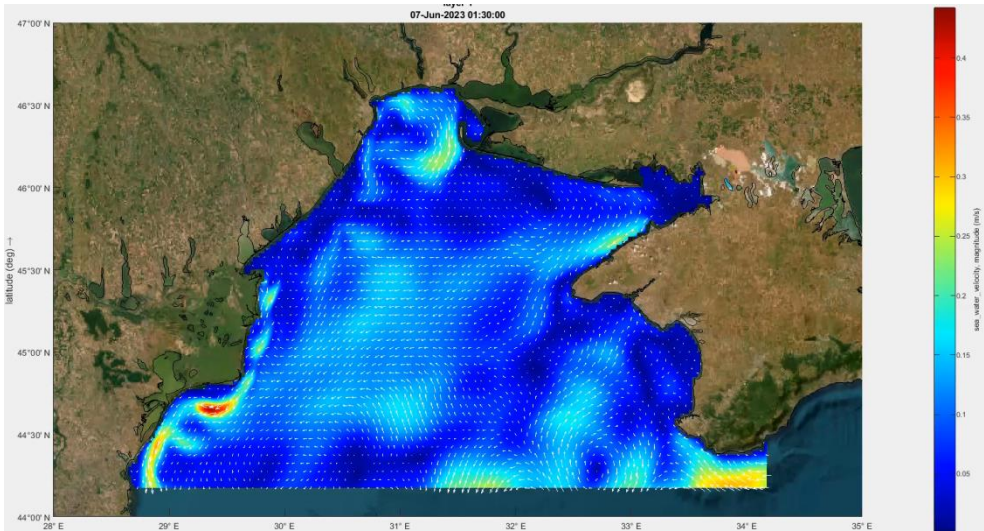


Рис. 9. Геомодель циркуляції водних мас в акваторії Чорного моря (7 червня 2023 р.)

## Висновки

В результаті проведених досліджень розглянуто важливі чинники екологічної небезпеки для акваторії Чорного моря та прибережних екосистем суходолу внаслідок руйнування Каховської гідроелектростанції та зникнення Каховського водосховища. Запропоновано та апробовано підхід із використання космічного моніторингу, геоінформаційних технологій та математичного моделювання для оцінки та прогнозування наслідків екологічної катастрофи, що відбулася. Із використанням розробленої програмної складової проаналізовано багатоденні масиви гідрофізичних та метеорологічних даних з акваторії Чорного моря, що в перспективі дає можливість проведення комплексної екологічної оцінки наслідків катастрофи для екосистеми Чорного моря та прибережних територій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / [С.О. Довгий, Г.Я. Красовський, В.В. Радчук, О.М. Трофимчук та інші] // Під ред. С.О. Довгого. – К., 2010, 260 с.
2. Щипцов О.А. Цифровий вектор розвитку України: формування національної індустрії океанографічних геопросторових даних. *Геофізичний журнал*. 2021. Т. 43 № 1. С. 266–275. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225553>
3. Вплив аварії на Каховській ГЕС на морську екосистему: оновлені дані від Українського національного центру екології моря [Електронний ресурс]. Режим доступу [https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new\\_data\\_ges\\_status\\_ukrscses/](https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new_data_ges_status_ukrscses/)
4. Щипцов О.А., Гордєєв А.Ю., Лебідь О.Г., Охарєв В.О., Теличко Р.І., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І. Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. Т. 45, № 1. С. 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
5. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Гончаренко Р.В., Титюк Т.Г., Щипцов О.А. Автоматизований модельний комплекс для забезпечення діяльності Військово-Морських Сил України оперативними прогнозами океанографічних умов. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського*. 2020. № 3(70). С. 75–83. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>
6. Шундель О.І. Розробка математичної моделі шаруватого неоднорідного середовища як складової частини Банку океанографічних даних Національної академії наук України. *Океанографічний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану)*. 2021. №3 (14). С. 29–49. [https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20\(14\).36](https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20(14).36)
7. Шундель, О.І., Федосєєнков С.Г. Створення системи комплексного моніторингу стану водного середовища Чорного моря шляхом його математичного моделювання. *Екологічна безпека та природокористування*. 2022. Т. 41, №1. С. 111–120. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>
8. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Нестеренко Л.В., Тимченко Ю.А., Федосєєнков С.Г., Шундель О.І., Щипцов О.А., Щипцов О.О. Гідрофізичні дослідження морського та річкового середовища. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 6. С. 111–127. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190070>
9. Голодов М.Ф., Гордєєв А.Ю., Попов Ю.І., Федосєєнков С.Г., Щипцов О.А., Щипцов О.О. Комплексні морські (річкові) експедиційні дослідження – важливий напрям розвитку науково-технічного потенціалу морегосподарського комплексу країни. *Геофізичний журнал*. 2019. Т. 41, № 5. С. 206–221. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183631>
10. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA [О.М. Трофимчук, В.В. Радчук, Г.Я. Красовський] // Під ред. С.О. Довгого. – К., 2013, 316 с.
11. Щипцов О.А., Крета Д.Л., Лебідь О.Г., Шевякіна Н.А. Використання результатів дистанційного зондування Землі в задачах моніторингу навігаційно-гідрографічної обстановки. *Екологічна безпека та природокористування*. 2020. Т. 36, № 4. С. 66–76. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>

*Стаття надійшла до редакції 08.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 06.12.2023*

## REFERENCES

1. Dovhyi, S.O., Krasovskiy, H.Ya., Radchuk, V.V., & Trofymchuk, O.M. (2010). Modern information technologies of environmental monitoring of the Black Sea. S.O. Dovhyi (Ed.). Kyiv.
2. Shchypstov, O. A. (2021). Digital Vector of Ukraine development: Formation of national industry of Oceanographic Geospatial Data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(1), 266–275 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v43i1.2021.225553>
3. The impact of the Kakhovskaya HPP accident on the marine ecosystem: updated data from the Ukrainian National Center for Marine Ecology. Retrieved from: [https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new\\_data\\_ges\\_statsu\\_ukrsces/](https://sea.gov.ua/index.php/2023/07/17/new_data_ges_statsu_ukrsces/)
4. 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>
5. Tuchkovenko, Yu. S., Kushnir, D. V., Honcharenko, R. V., Tytiuk, T. H., & Shchypstov, O. A. (2020). An automatized modeling complex to support the activity of the Naval Forces of Ukraine by providing the operational forecasts of oceanographic conditions. *Zbirnyk naukovykh prats Tsentru voienno-stratehichnykh doslidzhen Natsionalnoho universytetu oborony Ukrainy im. I. Cherniakhovskoho*, 3(70), 75–83 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2020-3-70/75-83>
6. Shundel, O. I. (2021). Development of a mathematical model of a layered heterogeneous environment as a component of the Oceanographic Data Bank of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Okeanohrafichnyi zhurnal (Problemy, metody ta zasoby doslidzhen Svitovoho okeanu)*, 3(14), 29–49 [in Ukrainian]. [https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20\(14\).36](https://doi.org/10.37629/oj.vi3%20(14).36)
7. 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 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.111-120>
8. Golodov, M. F., Gordieiev, A. Y., Nesterenko, L. V., Tymchenko, Y. A., Fedoseenkov, S. G., Shundel, O. I., Shchypstov, O. A., & Shchypstov, O. O. (2019). Hydrophysical research of the marine and river environments. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(6), 111–127 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190070>
9. Golodov, N. F., Gordeyev, A. Y., Popov, Y. I., Fedoseenkov, S. G., Shchiptsov, O. A., & Shchiptsov, O. O. (2019). Complex marine (river) expeditionary studies – an important direction of development of scientific and technical potential of the sea-economy complex of the country. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 41(5), 206–221 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i5.2019.183631>
10. Trofymchuk, O. M., Radchuk, V. V., & Krasovskiy, H. Y. (2013). Environmental monitoring using space images from the NOAA satellite. S.O. Dovhyi (Ed.). Kyiv [in Ukrainian].
11. Shchypstov, O. A., Kreta, D. L., Lebid, O. G., & Sheviakina, N. A. (2020). Use of remote sensing results in the tasks of navigational and hydrographic situation monitoring. *Environmental Safety and Natural Resources*, 36(4), 66–76 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>

*The article was received 08.09.2023 and was accepted after revision 06.12.2023*

### **Лебідь Олексій Григорович**

доктор технічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

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



**Охарев Вячеслав Олександрович**

кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

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

**Федосєнков Сергій Генадійович**

кандидат геологічних наук, заступник 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, старший науковий співробітник відділу панорамних акустичних систем 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

**Теличко Роман Ігорович**

провідний інженер Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3574-7919> **e-mail:** roman.telychko@gmail.com

**Клименков Олег Анатолійович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7664-5225> **e-mail:** oleg@klymenkov.com

УДК 502.51:504.5

**Taras Trysnyuk**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com

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

## **REMOTE METHODS OF RESEARCH ASSESSMENT OF THE IMPACT OF AGRICULTURAL ECONOMIC PROCESSES ON THE ENVIRONMENTAL DESTRUCTION OF THE TERRITORY**

**Abstract.** *The research is about solving the problem of assessing the impact of agricultural processes on the environmental safety of territories. The research was carried out on the selection, uploading and processing of data from the aerial survey of the area. High-quality multispectral images of the study areas were selected in accordance with the time-related thematic tasks of aerospace research of agricultural plots. With the help of Google Earth Engine platform, JavaScript programming language, ENVI and ArcMap software complexes, segmentation of the image of space images was carried out on these images. Each of them has its own normalized color scale, and highlights certain objects with different colors. To improve the visualization of differences in images, the classification of index images using the Isodata method was studied.*

*An Agrocontrol module for automated deciphering of agricultural was developed. The module allows to select agricultural land with further vectorization and the possibility of creating a geodatabase automatically. Based on results, preliminary cartographic models of the studied territories were created with the indication of land plots that are dangerous for the ecological state of the region and require more careful consideration.*

*At the stage of practical research, an analysis of the received data, based on the agricultural holding "Mriya", was carried out on the scheme of crop rotation, hybrids of grain crops grown on the territory of the plots, the types and amount of fertilizers used, as well as the volume of the harvest for the last 5 years. This made it possible to prove the correlation between the chemical composition of the used fertilizers and the corresponding exceedances of the MPC norms of the soil samples chemical composition.*

**Key words:** *information technologies; ecosystem; soils; topography; spectral channels; remote methods; contact methods.*

**Т.В. Триснюк**

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

## **ДИСТАНЦІЙНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПРОЦЕСІВ НА ЕКОЛОГІЧНУ БЕЗПЕКУ ТЕРИТОРІЇ**

**Анотація.** *Роботу присвячено розв'язанню науково-практичного завдання дослідження оцінки впливу сільськогосподарських процесів на екологічну безпеку території. В процесі дослідження проведена робота по відбору, завантаженню та обробці даних аерокосмічної зйомки місцевості. Відібрано якісні мультиспектральні знімки території дослідження відповідно до*

часових тематичних задач аерокосмічних досліджень сільськогосподарських ділянок. За допомогою платформи Google Earth Engine та мови програмування JavaScript, програмних комплексів ENVI та ArcMap по цих знімках проведено сегментацію зображення космічних знімків. Кожен із них має власну нормовану кольорову шкалу та виділяє різними кольорами певні об'єкти. Для покращення візуалізації відмінностей в зображеннях досліджено класифікацію індексних зображень за методом Isodata.

В результаті дослідження розроблено модуль автоматизованого дешифрування сільськогосподарських угідь "Agrocontrol". Даний модуль дозволяє в автоматизованому режимі виділяти сільськогосподарські угіддя з подальшою векторизацією та можливістю створення бази геоданих. На основі отриманих результатів створено попередні картографічні моделі досліджуваних територій із зазначенням земельних ділянок, що є небезпечними для екологічного стану регіону та потребують більш ретельного розгляду.

На етапі практичних досліджень проведено аналіз отриманих даних (на основі агрохолдингу "Мрія") про схему проведення сівозміни, гібриди зернових культур, що вирощуються на території ділянок, види та кількість вживаних добрив, а також об'єм врожаю за останні 5 років. Це дозволило довести кореляцію між хімічним складом вживаних добрив та відповідними перевищеннями норм ГДК хімічного складу ґрунтових проб.

**Ключові слова:** інформаційні технології; екосистема; ґрунти; рельєф місцевості; спектральні канали; дистанційні методи; контактні методи.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.145-151>

## Вступ

Дистанційні дослідження земель с/г призначення ведуться вже протягом багатьох років, однак на сьогоднішній день в Україні необхідно вдосконалити технологію проведення моніторингу сільськогосподарських угідь, яка б забезпечила: контроль за використанням земель та станом ґрунтів; цілеспрямоване управління технологічним процесом вирощування екологічно чистої сільськогосподарської продукції; збереження родючості ґрунтів; раціональне використання земель с/г призначення. Відомі на цей час методи моніторингу земель потребують постійного удосконалення, оскільки стрімко розвиваються технічні засоби ДЗЗ у напрямках показників розрізнення, оперативності, набору спектральних інтервалів зйомок. Особливо це ілюструється можливостями використання мікросупутників, які вже на сьогодні реально забезпечують широке коло користувачів космічними знімками нового покоління [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Експериментальні дослідження техногенних чинників, пов'язані із моделюванням території досліджень та проведенням розрахунків індексних зображень для вегетаційних індексів NDVI, NDWI та GVI за матеріалами мультиспектральних космоснімків, ґрунтуються на використанні методики експертної оцінки та інформаційних технологій. В Україні основними науковцями в області космічних досліджень ґрунтів є: Лялько В.І. – спектральні характеристики рослинного покриву; Попов М.О. – прогнозування врожайності зернових культур за багатоспектральними даними ДЗЗ [2], Трофимчук О.М., Красовський Г.Я., Греков Л.Д. – космічний моніторинг забруднення земель [3, 4], Панас Р.М. – космічний моніторинг деградації ґрунтів [5].

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка та удосконалення інформаційно-технічного моделювання сільськогосподарських процесів за матеріалами мультиспектральних космознімків.

### **Виклад основного матеріалу дослідження**

Основні вимоги користування землями сільськогосподарського призначення викладені у низці документів, таких як Земельний кодекс України, Закон України «Про землеустрій», Закон України «Про охорону земель», Кодекс України «Про адміністративні правопорушення», Закон України «Про меліорацію земель», Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів щодо дерегуляції господарської діяльності з проведення робіт із землеустрою та землеоціночних робіт». В контексті наведеного вище видаються актуальними шляхи розробки сучасних інформаційних ДЗЗ/ГІС технологій, спроможних забезпечити ефективну підтримку рішень у наступних напрямках:

- здійснення постійного контролю екологічного стану сільськогосподарських угідь визначеного суб'єкта господарської діяльності або адміністративного устрою держави;
- виявлення с/г угідь, які використовуються не згідно з цільовим призначенням;
- виявлення ділянок, на які були невірно/неправомірно видані документи права власності або користування землею;
- сприяння у створенні загальнодержавної системи охорони ґрунтів.

В даний час необхідно використовувати останні досягнення інформаційних технологій у програмній реалізації (використання сучасного програмного забезпечення (ПЗ) обробки даних та побудови геоінформаційної системи (ГІС) земельної ділянки), апаратних засобах (новітня сільськогосподарська техніка, прилади контролю її роботи тощо) та агрохімічному аналізі (вивчення хімічного складу ґрунту кожної окремо взятої ділянки, підбір відповідної генетично виведеної зернової культури, а також підбір відповідних добрив). Сучасними рішеннями цього питання є можливість точкового внесення добрив за допомогою GPS (global positional system) датчиків, що встановлені у системах автоматизованого управління сільськогосподарською технікою (технологія Machine Control), здійснювання планових польотів безпілотних літальних апаратів (БПЛА) із відповідною фотоапаратурою, або використання серій різночасових космічних знімків території земельної ділянки (технології дистанційного зондування землі (ДЗЗ)). В Інституті накопичений значний практичний досвід розробки методик, алгоритмів і спеціалізованих програмних комплексів тематичної обробки космічних знімків просторового планування розвитку ґрунтового покриву, сміттєзвалищ, водних систем. В процесі дослідження використані матеріали станції прийому супутникової інформації NOAA в режимі реального часу та програмне забезпечення ArcGIS 9.2.2. Ми використовуємо один із найпоширеніших методів виділення об'єктів на аерокосмічних зображеннях Землі – сегментацію. Під сегментацією, в широкому сенсі, розуміємо перетворення напівтонових або кольорових зображень у зображення, що мають менше число тонів або кольорів, ніж вихідні. У вузькому сенсі сегментація – перетворення зображення в дворівневе

(бінарне), що містить всього два рівні яскравості – мінімальний (зазвичай це 0) і максимальний (зазвичай 255) (наприклад: виділення полів з озимими культурами чи полів, де проводилася осіння оранка (рис. 1)).

а)



б)

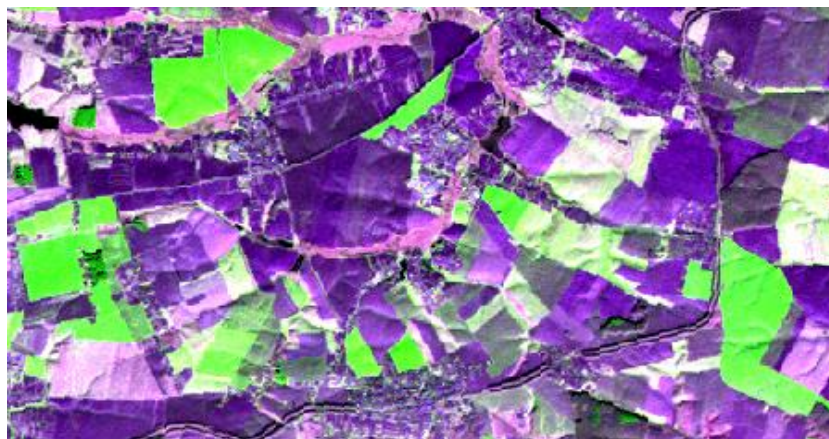


Рис. 1. Космічний знімок сегментації зображень агрохолдингу "Мрія": а – сегментація зображення Landsat-5 (2022 р.); б – виділення озимих культур Landsat-5 (2022 р.)

Метою сегментації є виділення областей, однорідних в певному заданому сенсі (сегментів). Однорідність є ознакою належності області до певного класу. Для сільськогосподарських угідь – виділення земель одного типу або з однаковим типом рослинності [6].

Сільськогосподарські угіддя та рослинність, яка проростає на них, характеризуються наявністю "малюнка" (текстури), що повторюється та складається з певних однорідних ділянок приблизно однакових розмірів.

При обробці даних ДЗЗ застосовуються три основні способи сегментації зображень: порогова, шляхом нарощування областей, шляхом виділення границь.

Для дешифрування сільськогосподарських угідь на аерокосмічних знімках найбільш підходить сегментація шляхом виділення границь, яка заснована на сегментації шляхом нарощування областей.

У способі сегментації шляхом нарощування областей, виділяються однорідні області із значенням яскравості (вектора яскравості). Схема алгоритму цього методу передбачає вибір стартового пікселя і розгляд суміжних з ним пікселів для перевірки близькості їх значень, наприклад, по евклідовій відстані. Якщо значення яскравості поточного і якогось суміжного пікселів виявляються близькими, то ці пікселі зараховуються в одну область. Таким чином, область формується в результаті зрощування окремих пікселів. На певному етапі (залежно від модифікації алгоритму) область перевіряється на однорідність і, якщо результат перевірки виявляється негативним, то область розбивається на більш дрібні ділянки. Процес продовжується до тих пір, поки всі виділені області не витримають перевірки на однорідність [7].

Алгоритм автоматизованого дешифрування сільськогосподарських угідь складається з наступних етапів:

- проведення сегментації вхідного зображення для максимального розділення класів (вибір необхідної комбінації каналів);
- автоматизоване оконтурювання сільськогосподарських угідь методом сегментації шляхом нарощування областей. Однорідність області перевіряється на рівні порогів трьох компонент RGB-комpositу (для підвищення якості дешифрування можливе ручне встановлення даних порогів);
- збереження контурів в бінарному вигляді (0 – фон, 1 – поле);
- векторизація растрових полігонів, отримання векторного типу даних в форматі \*.shp.;
- розрахунок площі і периметра сільськогосподарської ділянки та присвоєння ідентифікаційного номеру та внесення додаткової інформації;
- експорт отриманих векторів в базу геоданих, яку можливо використовувати для подальшої роботи в світових ГІС-стандартах.

На основі розробленого алгоритму за допомогою програмного забезпечення ArcGIS 10.2 було розроблено модуль автоматизованого дешифрування с/г "Agrocontrol" (рис. 2). Даний модуль дозволяє в автоматизованому режимі виділяти сільськогосподарські угіддя з подальшою векторизацією та можливістю створення бази геоданих.

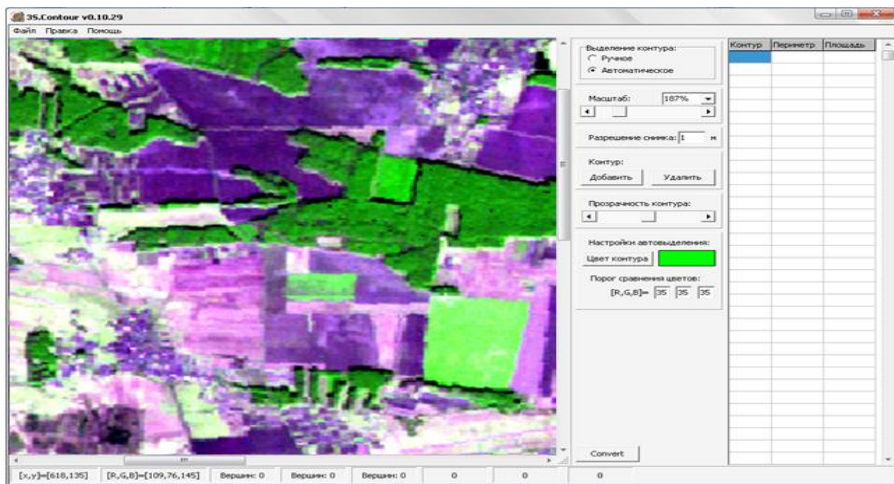


Рис. 2. Вигляд робочого вікна та результати дешифрування сільськогосподарських угідь з використанням модуля "Agrocontrol"

## Висновки

Результати досліджень показали, що автоматизація процесу виділення сільськогосподарських структур на мультиспектральних зображеннях дає очікувані результати. Застосування розробленої технології оцінки антропогенного забруднення сільськогосподарських угідь, з використанням геоінформаційних технологій та даних ДЗЗ дозволяє:

- зменшити часові, фізичні і фінансові витрати на проведення еколого-агрохімічного обстеження ґрунтів та оцінки їх екологічного стану;
- скоротити витрати праці, прискорити роботи з обстеження ґрунтів.

В дослідженнях визначено основні дешифрувальні ознаки різних типів сільськогосподарських угідь на аерокосмічних знімках, які дозволяють проводити контроль за веденням сільськогосподарської діяльності. Розроблений алгоритм дешифрування даних ДЗЗ та створений автоматизований модуль "Agrocontrol" в програмному забезпеченні ArcGIS 10.2 дозволяє зменшити час на створення цифрової карти поля та для проведення еколого-агрохімічного обстеження ґрунтів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Красовський Г.Я., Трофимчук О.М., Крета Д.Л., Клименко В.І., Пономаренко І.Г., Суходубов О.О. Синтез картографічних моделей забруднення земель техногенним пилом з використанням космічних знімків // Екологія і ресурси. – К.: ПНБ, 2005. – №12. – С. 37–55.
2. Trofymchuk, O., Kalyukh, Y., Hlebchuk, H. [2013] Mathematical and GIS-modeling of landslides in Kharkiv region of Ukraine. Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling. – Springer, Berlin, Heidelberg. 347–352.
3. Трофимчук О.М., Адаменко О.М., Триснюк В.М. Геоінформаційні технології захисту довкілля природно-заповідного фонду / Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України; Івано-Франківський нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ : Супрун В.П., 2021. – 343 с. // ISBN 978-617-7468-53-9.
4. Машков О.А.; Триснюк В.М.; Мамчур Ю.В.; Жукаускас С.В.; Нігородова С.А.; Курило А.В. Новий підхід до синтезу відновлюючого керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: наук.-техн. журн. – Івано-Франківськ : Симфонія форте. – 2019. № 1. (19) 2019. С. 69–77. <http://dspace.nbu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/162108/03-Mashkov.pdf?sequence=1>
5. Триснюк В.М. Система управління екологічною безпекою природних і антропогенно-модифікованих геосистем. Системи обробки інформації. – 2016. – №12. – С. 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. V. Trysnyuk, T. Trysnyuk, V. Okhariev, V. Shumeiko, A. Nikitin. Cartographic Models of Dniester River Basin Probable Flooding. Centrul Universitar Nord Din Bala Mare – UTPRESS ISSN 1582-0548, №1, 2018. С. 61–67.

*Стаття надійшла до редакції 09.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 30.10.2023*

## 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 09.08.2023 and was accepted after revision 30.10.2023*

### **Триснюк Тарас Васильович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу прикладної інформатики Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

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

**ORCID ID:** <https://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** taras24t@gmail.com



УДК 004.89:519.22 (043.3)

**Oleksandr Terentiev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Principal researcher

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> *e-mail*: o.terentiev@gmail.com

**Denys Prosyankin**, graduate student

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4402-6921> *e-mail*: dipruman@ukr.net

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

## IMPROVEMENT OF CEREAL HARVEST PROGRAMMING METHODS USING COMPUTER SIMULATION INFORMATION TECHNOLOGY

**Abstract.** *The paper is dedicated to a topical scientific and applied problem – the development of information technology of computer modelling intended for programming the yield of agricultural crops. The paper describes information technology of computer modelling of the yield of agricultural crops (on the example of *Avena sativa* subsp. *nudisativa*), which is based on the application of Bayesian methods to modelling and prediction in conditions of statistical, parametric and structural uncertainty. The study was based on the materials of laboratory experiments carried out in conditions close to natural, on the prediction of physiological processes occurring in plants under the influence of regulated and unregulated factors.*

*Proposed approach described the change in the productivity of grain crops, in particular *Avena sativa* subsp. *nudisativa*, depending on the parameters of plant growth and development, photosynthetic apparatus and duration of its functioning. Scientific novelty of the work was application of probabilistic and statistical models in the form of Bayesian networks in the system of programming the yield of agricultural crops.*

*The paper considered several scenarios of the combined effect of growth regulators and herbicides on the productivity of *Avena sativa* subsp. *nudisativa*. Net productivity of photosynthesis was chosen as the target variable of the studied process. Mathematical models in the form of Bayesian network turned out to be adequate for the process chosen for modelling. Achieved error of model classification was about 20%. The model structure was built in Genie 2.0 modelling system. It was found that by researching and simulating potential opportunities of ecological features of plants, it was possible to achieve an increase in yield by reducing the doses of herbicides and growth regulators by their combined use, which significantly increased the crop quality.*

*Proposed information technology uses methods of intelligent data analysis, has a modular structure and can be used separately and as part of other information and analytical systems.*

**Keywords:** *modelling; mathematical models; Bayesian network; biological processes; ecological crop production.*

О.М. Терентьєв, Д.І. Присянкін

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

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ПРОГРАМУВАННЯ УРОЖАЮ ЗЕРНОВИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

***Анотація.** Стаття присвячена актуальній науково-прикладній проблемі – розробці інформаційної технології комп'ютерного моделювання, призначеної для програмування урожайності сільськогосподарських культур. В роботі описано інформаційну технологію комп'ютерного моделювання урожайності сільськогосподарських культур (на прикладі вівса голозерного), яка базується на застосуванні байєсівських методів до моделювання та прогнозування в умовах статистичної, параметричної та структурної невизначеності. Дослідження виконане на матеріалах лабораторних дослідів, проведених в умовах, наближених до природних, з прогнозування фізіологічних процесів, які відбуваються у рослинах під впливом регульованих та нерегульованих чинників.*

*Пропонований підхід описує зміну урожайності зернових культур, зокрема вівса голозерного, в залежності від параметрів росту і розвитку рослин, фотосинтетичного апарату та тривалості його функціонування. Науковою новизною роботи є застосування ймовірнісно-статистичних моделей у формі мереж Байєса у системі програмування урожайності сільськогосподарських культур.*

*В роботі розглянуто декілька сценаріїв сумісного впливу рострегуляторів та гербіцидів на урожайність вівса голозерного. В якості цільової змінної досліджуваного процесу обрана чиста продуктивність фотосинтезу. Математичні моделі у вигляді мережі Байєса виявилися адекватними обраному для моделювання процесу. Досягнута помилка класифікації моделей становить близько 20%. Структуру моделі побудовано в системі моделювання Genie 2.0. Виявлено, що дослідивши та змодельовавши потенційні можливості екологічних особливостей рослин, можна досягти зростання урожайності за рахунок зменшення доз гербіцидів і регуляторів росту за сумісного їх використання, що значно підвищує якість врожаю.*

*Пропонована інформаційна технологія використовує методи інтелектуального аналізу даних, має модульну структуру та може застосовуватись окремо та в складі інших інформаційно-аналітичних систем.*

***Ключові слова:** моделювання; математичні моделі; мережа Байєса; біологічні процеси; екологічне рослинництво.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.152-169>

### Вступ

Зростаючі потреби у продукції сільського господарства вимагають його переходу на якісно новий рівень землеробства, який забезпечує найбільш повне та ефективне використання земельних ресурсів, добрив, засобів захисту рослин, регуляторів росту, урахування кліматичних умов, енергозбереження тощо. Тобто, актуальним завданням є створення і впровадження науково обґрунтованих технологій вирощування сільськогосподарських культур,

основаних на програмуванні врожаю, ощадливому використанні наявних ресурсів, мінімізації навантаження на агроєкосистему. Програмування врожаю – один із напрямів аграрної науки, завданням якого є оптимізація умов вирощування рослин на основі впровадження методів землеробства, які дозволяють перевести рослинництво на контрольовану основу. Такий підхід передбачає дослідження закономірностей перебігу процесів розвитку та росту рослин, аналіз причинно-наслідкових зв'язків факторів, що впливають на них, особливо біологічних, побудову відповідних моделей та прогнозів. Отже, потрібна інформаційна технологія, яка б спростила накопичення та обробку даних, містила інструменти інтелектуального аналізу даних, спеціалізовані інструменти обробки даних лабораторних та польових дослідів, виконання значної кількості розрахунків, побудову моделей різних типів, зокрема математичних, тощо.

Сьогодні в аграрному секторі для програмування урожайності сільськогосподарських культур потужний аналітичний інструментарій математичного моделювання використовується дуже обмежено. Значною мірою це пов'язано з відсутністю опрацьованих та готових до практичного застосування методик комп'ютерного моделювання та інформаційних технологій, адаптованих для роботи з даними, що характеризують агрометеорологічні, агрофізичні, агрохімічні та агротехнічні фактори урожайності. Тому, проблема розробки інформаційної технології комп'ютерного моделювання урожайності сільськогосподарських культур, придатної до використання у системі програмування урожайності, має наукове та практичне значення.

Пропонована в даній роботі інформаційна технологія комп'ютерного моделювання дозволяє поєднати експериментальні дослідження, сучасні інформаційні технології обробки даних, математичний апарат та практичні підходи до програмування врожаю сільськогосподарських культур, моделюючи фізіологічні процеси, що відбуваються в рослинах під впливом регульованих та нерегульованих факторів. Все це свідчить про високу актуальність досліджень.

## **Постановка задачі**

Дана робота є продовженням дослідження, представленою в роботі [1].

Метою дослідження є удосконалення існуючих методик програмування врожаю сільськогосподарських культур на основі інформаційної технології комп'ютерного моделювання, особливістю якої є застосування ймовірнісно-статистичних моделей для прогнозування фізіологічних процесів, які відбуваються у рослинах під впливом регульованих та нерегульованих чинників.

Задачі дослідження:

- виконати дослідження сучасних методів моделювання та прогнозування процесів розвитку та росту рослин в умовах невизначеності, спричиненої впливом чинників зовнішнього середовища та агрохімічних факторів;
- проаналізувати дані, що використовуються для дослідження урожайності сільськогосподарських культур, зокрема, отримані в ході лабораторних дослідів;

- розробити методику побудови комп'ютерних моделей для опису та прогнозування соціально-економічних процесів та систем в умовах невизначеності;
- удосконалити методику комп'ютерного моделювання процесів розвитку та росту рослин під впливом гербіцидів та регуляторів росту;
- побудувати ймовірно-статистичні моделі у формі мережі Байєса, які описують сумісний вплив регуляторів росту та гербіцидів на урожайність сільськогосподарських культур;
- виконати апробацію пропонованих моделей та методів комп'ютерного моделювання у системі програмування урожайності;
- виконати аналіз адекватності побудованих моделей на матеріалах лабораторних дослідів, проведених в умовах, наближених до польових, та сформулювати на їх основі висновки щодо можливості їх застосування для розв'язання задач програмування врожаю сільськогосподарських культур.

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

Складність створення аналітичного інструментарію для розв'язання задач моделювання, прогнозування та підтримки прийняття рішень у сільському господарстві пов'язана з необхідністю урахування значної кількості факторів, зокрема таких, що характеризують біологічні та фізіологічні процеси сільськогосподарських культур під впливом факторів зовнішнього середовища, які можуть бути як керованими, так і некерованими, передбачити можливі проблемні ситуації, сценарії розвитку подій, можливі наслідки та потенційні ризики [2–8]. Переважають такі інформаційні системи, як е-сільське господарство, системи точного землеробства тощо. Прикладами таких програмних продуктів є розробки підприємств-партнерів компанії KPMG [9], EOS Data Analytics [10], Технопарку Київського національного університету імені Тараса Шевченка [11], УкрНДПІВТ ім. Л. Погорілого [12]. Слід зазначити, що більшість з них не містять підсистем прогнозного моделювання урожайності сільськогосподарських культур. Потужні модельні комплекси, такі як Vensim 5.0, AnyLogic та NetLogic, AutoStat, OptQuest, OPTIMIZ, SimRunner2, WITNESS Optimizer тощо, також не набули поширення. Тобто цей сегмент ІТ-ринку залишається недостатньо опрацьованим.

Оскільки більшість процесів в сільському господарстві, зокрема рослинництві, характеризуються наявністю нелінійності та нестационарністю, для урахування цих особливостей, пропонується удосконалення методології моделювання і прогнозування таких процесів на основі нових підходів до моделювання і прогнозування, які передбачають комбіноване застосування класичного статистичного і ймовірного (байєсівського) підходів, ситуаційне та сценарне моделювання та прогнозування. Зокрема, об'єднання методів оптимальної фільтрації, регресійного аналізу і байєсівського підходу дає можливість будувати моделі високого ступеня адекватності для нелінійних нестационарних процесів у рослинництві і отримувати на їх основі оцінки прогнозів високої якості [1, 12–17].

Оптимальним інструментом поєднання у єдиній інформаційній технології математичного моделювання, інтелектуального аналізу даних та комп'ютерної системи є комп'ютерне моделювання. Саме комп'ютерне моделювання надає

можливості найбільш повного відображення стану та динаміки досліджуваних систем, які можна реалізувати на сьогоднішній день.

### Теоретичні основи дослідження

Мережа Байєса представляє собою пару [13, 18, 19]  $\langle G, B \rangle$ , де  $G$  – це направлений ациклічний граф, а  $B$  – це множина параметрів, що визначають мережу, або множина таблиць умовних ймовірностей вершин (СРТ – conditional probability table). Таблиці умовних ймовірностей дозволяють визначити кількісно вплив причин на умовні ймовірності настання випадкових подій.

Нехай,  $P = P(X^{(i)} | pa(X^{(i)}))$ ,  $i = 1 \dots N$  для кожного можливого значення  $x^{(i)} \in X^{(i)}$  та  $pa(X^{(i)}) \in Pa(X^{(i)})$ , де  $Pa(X^{(i)})$  – множина батьків змінної (причин)  $X^{(i)} \in G$ . Кожна змінна  $X^{(i)} \in G$  є вершиною мережі Байєса. Повна спільна ймовірність мережі Байєса обчислюється за формулою (1) [13, 18, 19]:

$$P_B(X^{(1)}, \dots, X^{(N)}) = \prod_{i=1}^N P_B(X^{(i)} | Pa(X^{(i)})). \tag{1}$$

З математичної точки зору, мережа Байєса – це модель подання існуючих і відсутніх імовірнісних залежностей. При цьому зв'язок  $A \rightarrow B$  є причинним, коли подія  $A$  – причина виникнення  $B$ , тобто коли існує механізм, відповідно до якого значення, прийняте  $A$ , впливає на значення, прийняте  $B$ .

Нехай  $\Omega$  – випадковий простір (множина) подій випадкових експериментів, що містить всі можливі значення випадкової змінної. Наприклад, є дві події  $E \in \Omega$  і  $H \in \Omega$ , що, відповідно, є спостереженням та гіпотезою. Формула Байєса використовується для обчислення ймовірності того, що подія  $E$  відбудеться за умови, що відбулась подія  $H$ . Тобто, для обчислення  $P(E|H)$  – умовної ймовірності  $E$  для заданої події  $H$  [13, 18, 19].

Умовна ймовірність  $P(E|H)$  розраховується як відношення сукупної ймовірності подій  $E$  та  $H$ ,  $P(E \cap H)$  до ймовірності події  $H$ , за умови, що вона не дорівнює нулю (2) [13, 18, 19]:

$$p(E | H_k) = \frac{p(E \cap H_k)}{p(H_k)}. \tag{2}$$

Аналогічно для події  $H$  (3):

$$p(E | H) = \frac{P(H \cap E)}{P(E)}. \tag{3}$$

Тобто, правило Байєса (враховуючи властивість комутативності сукупної ймовірності) [13, 18, 19] матиме вигляд (4):

$$P(H | E) = \frac{P(E|H)P(H)}{P(E)}. \tag{4}$$

У формулі (4) відображені причинно-наслідкові зв'язки між спостереженнями та гіпотезами, по-іншому кажучи, вона описує залежності між умовними ймовірностями множини випадкових змінних, які розраховуються за формулою Байєса.

Ймовірності  $p(H)$  та  $p(E|H)$  є апіорними, тобто задаються до початку спостережень. Ймовірність  $p(E|H)$  є апостеріорною. Перевага байєсівського методу полягає в тому, що апіорні ймовірності можна уточнювати (оновлювати) відповідно до умов та характеру перебігу процесу, що досліджується, що дозволяє уточнювати ймовірності подій при надходженні додаткової інформації.

Тобто, мережа Байєса складається з якісної частини мережевої структурної моделі (DAG), яка являє собою граф, та кількісної складової – таблиць умовних ймовірностей (CPT), яка відображує реакцію дочірніх вузлів мережі на зміни у причинних вузлах мережі.

Головне припущення теорії побудови мереж Байєса полягає в тому, що події є вичерпними ( $\cup_{i=1}^n H_i = \Omega$ ) і не перетинаються (5). При виконанні цих умов, ймовірність події  $E$  можна розрахувати, скориставшись умовними ймовірностями [13, 18, 19].

$$p(E) = \sum_{i=1}^n p(E \cap H_i) = \sum_{i=1}^n p(E | H_i) \cdot p(H_i). \tag{5}$$

Підставивши даний вираз у формулу (4), отримаємо вираз (6) [13, 18, 19]:

$$p(H_k | E) = \frac{p(E | H_k) \cdot p(H_k)}{p(E)}, \tag{6}$$

який використовують для побудови мережі Байєса.

Формула Байєса має вигляд (7):

$$P(G | D) = \frac{P(D|G)P(G)}{P(D)}, \tag{7}$$

де  $G$  – направлений ациклічний граф, що відповідає випадковим змінним, а  $D = \{x^1, \dots, x^N\}$  – множина даних.

Прологарифмуємо (7):

$$\log(P(G | D)) = \log(P(D | G)) + \log(P(G)) + (-\log(P(D))). \tag{8}$$

У формулі (8) доданок  $-\log(P(D))$  – грає роль штрафної компоненти за надмірну складність моделі.

Для виконання точних розрахунків, пов'язаних з вибором моделі, необхідно обчислити  $P(D) = \sum_G P(D | G)$ , що є задачею експоненційної складності.

Тому, щоб спростити задачу, можна використовувати Байєсовий інформаційний критерій, який визначається як (9) [13, 18, 19]:

$$\log(P(G | D)) \approx \log(P(D | G, \hat{\theta}_G)) - \frac{\log(N)}{2} \cdot \dim(G), \quad (9)$$

де  $N$  – число моделей,  $\dim(G)$  – розмір моделі (кількість вільних параметрів),  $\hat{\theta}_G$  – максимально правдоподібна оцінка параметрів,  $-\frac{\log(N)}{2} \dim(G)$  – штрафуюча компонента за надмірно складні моделі.

Наступним кроком після вибору структури є навчання структури, так щоб направлений ациклічний граф найкраще задовольняв даним. Це завдання є NP-задачею. Тому, зазвичай використовують локальні алгоритми пошуку, такі як, наприклад, жадібний метод пошуку екстремуму або метод гілок і меж для пошуку в просторі графів тощо.

Всі існуючі сучасні методи побудови структури мереж Байєса можна умовно розділити на дві категорії [13, 20–23] на основі оціночних функцій (search & scoring) та застосовуючи тест на умовну незалежність (dependency analysis).

Для урахування структурно-параметричних невизначеностей і адекватного опису причинно-наслідкових зв'язків та можливих варіантів розвитку подій під впливом різних груп детермінованих та випадкових чинників моделі у формі мереж Байєса застосовується методика використання ймовірнісно-статистичних методів для уніфікованих за структурою моделей у просторі станів. Згідно з цією методикою, спочатку розв'язується задача оцінювання елементів структури і параметрів моделі. Структура моделі оцінюється на підставі дослідження закономірностей протікання процесу, застосування статистичних тестів для перевірки наявності нелінійності, інтегрованості, гетероскедастичності, аналізу кореляційних функцій, візуального аналізу даних. При цьому вибирається декілька найбільш ймовірних структур моделей-кандидатів. Потім обчислюються оцінки параметрів моделей-кандидатів і обирається краща з них, використовуючи статистичні характеристики адекватності моделей.

Для оцінювання якості роботи будь-якого методу побудови ймовірнісного висновку, можна скористатися такими характеристиками, як середньоквадратична похибка,  $KL$ -відстань або квадратична відстань Хеллінджера (Hellinger) [13, 18, 19].

Середньоквадратична похибка  $MSE$  (10):

$$MSE = \frac{1}{\sum_{X^{(i)} \in X \setminus E} \text{card}(A^{(i)})} \cdot \sum_{X^{(i)} \in X \setminus E} \left( \sum_{\forall x^{(i)} \in X^{(i)}} (P(x^{(i)} | e) - \hat{P}(x^{(i)} | e))^2 \right). \quad (10)$$

$KL$ -відстань  $D_K$  між значенням ймовірності  $P(X^{(i)} | e)$  та оцінкою  $\hat{P}(X^{(i)} | e)$  (11) [13, 18, 19]:

$$D_K(P(X^{(i)} | e), \hat{P}(X^{(i)} | e)) = \sum_{\forall x^{(i)} \in A^{(i)}} \left( P(x^{(i)} | e) \cdot \log \left( \frac{P(x^{(i)} | e)}{\hat{P}(x^{(i)} | e)} \right) \right). \quad (11)$$

*KL-відстань*  $D_K$  всієї мережі Байєса (12) [13, 18, 19]:

$$D_K(P, \hat{P}) = \frac{1}{\text{card}(X \setminus E)} \cdot \sum_{X^{(i)} \in X \setminus E} D_K(P(X^{(i)}|e), \hat{P}(X^{(i)}|e)). \quad (12)$$

Квадратична відстань Хеллінджера  $D_H$  між значенням ймовірності  $P(X^{(i)}|e)$  та оцінкою  $\hat{P}(X^{(i)}|e)$  (13) [13, 18, 19]:

$$D_H(P(X^{(i)}|e), \hat{P}(X^{(i)}|e)) = \sum_{\forall X^{(i)} \in A^{(i)}} \left( \sqrt{P(X^{(i)}|e)} - \sqrt{\hat{P}(X^{(i)}|e)} \right)^2. \quad (13)$$

Квадратична відстань Хеллінджера  $D_H$  всієї мережі Байєса:

$$D_H(P, \hat{P}) = \frac{1}{\text{card}(X \setminus E)} \cdot \sum_{X^{(i)} \in X \setminus E} D_H(P(X^{(i)}|e), \hat{P}(X^{(i)}|e)). \quad (14)$$

У формулах (11–14) [13, 18, 19–22]  $X = \{X^{(1)}, \dots, X^{(N)}\}$  – множина всіх вершин графа мережі Байєса  $G$ , де кожна  $j$ -а вершина мережі ( $j = 1, \dots, N$ ) має  $A^{(j)} = \{0, 1, \dots, \alpha^{(j)} - 1\}$  ( $\alpha^{(j)} \geq 2$ ) станів; запис  $\text{card}(A^{(j)})$  означає потужність множини  $A^{(j)}$  (кількість елементів, з яких складається множина);  $E \subset X, E = e$  – множина подій (інстанційовані вершини);  $P(X^{(i)}|e)$  – значення ймовірності вершини  $X^{(i)}$  за умови відбуття події,  $E = e$ ,  $\hat{P}(X^{(i)}|e)$  – значення оцінки ймовірності.

### Методика дослідження

Особливістю дослідження біологічних систем є задача збору та накопичення знань та даних з означеної проблеми, їх обробка із використанням сучасних інформаційних технологій, на основі яких із використанням методів Data Science виконується повний цикл задач аналітичного процесу, починаючи від аналізу якості даних та роботи з пропусками, до побудови сценаріїв з використанням моделей-кандидатів розвитку суб'єкта дослідження на основі методів інтелектуального аналізу даних. Пропонована схема використання комп'ютерного моделювання в системі програмування урожайності сільськогосподарських культур представлена на рис. 1.

Отже, основна ідея роботи полягає у створенні технології комп'ютерного моделювання, призначеної для автоматизації процесу програмування урожайності сільськогосподарських культур, яка буде вирішувати проблеми дослідження перебігу процесів росту та розвитку рослин, консолідувати найбільш вагомі показники, за якими можна оцінити стан та динаміку їх розвитку при прийнятті рішення щодо застосування необхідних агротехнічних заходів. Запропонована інформаційна технологія комп'ютерного моделювання



допоможе зменшити час опрацювання великих масивів даних для швидкого реагування на виникнення проблем у розвитку рослин, які в подальшому можуть призвести до погіршення якості та втрат урожаю.

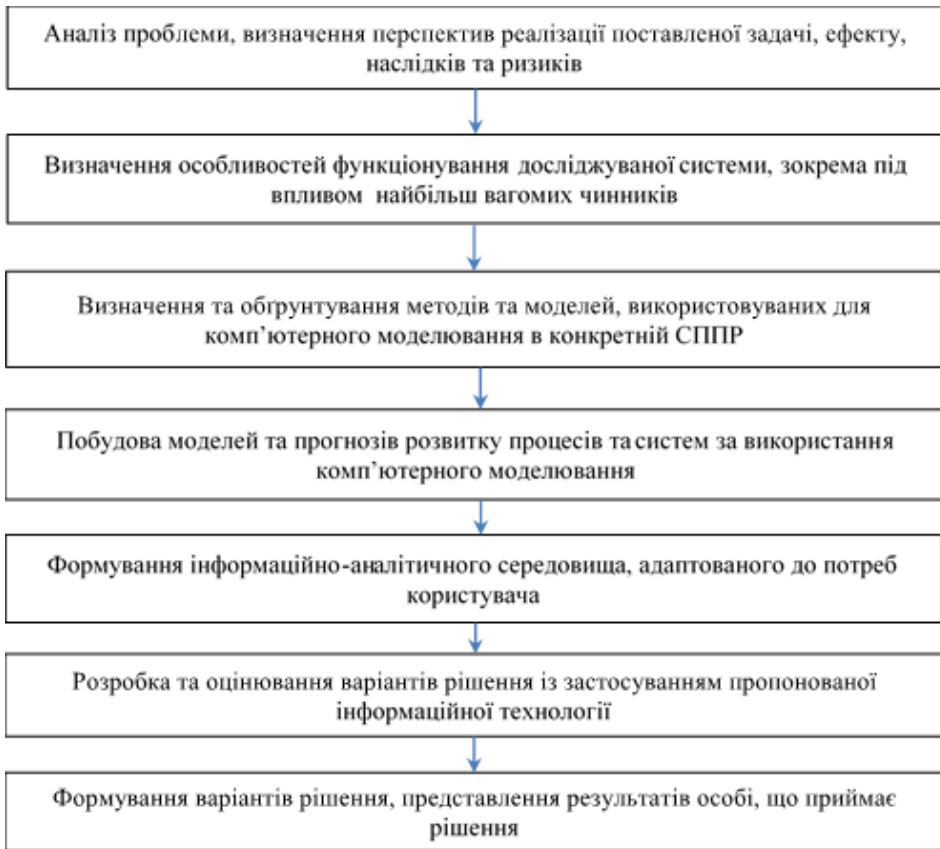


Рисунок 1. Схема використання комп'ютерного моделювання для моделювання та прогнозування

В даній роботі запропонована інформаційна технологія комп'ютерного моделювання у дослідженні впливу гербіцидів та регуляторів росту на фотосинтетичний апарат рослин зернових культур. Процес фотосинтезу здійснює суттєвий вплив і може визначати спрямованість та перебіг фізіолого-біохімічних процесів у рослинах, в тому числі й таких, що впливають на формування врожаю. Вплив вказаних показників залежить від кліматичних умов, технології вирощування, біологічних особливостей сорту тощо. Тому, одним із найважливіших завдань підвищення екологічності рослинництва є дослідження впливу керованих та некерованих факторів на формування продуктивності фотосинтезу. Суттєвий вплив на показники фотосинтезу сільськогосподарських культур чинить застосування біологічно активних речовин, таких як регулятори росту та гербіциди. Їх раціональне поєднання сприяє не лише підвищенню урожайності сільськогосподарських культур, а й створює умови для покращення якості продуктів харчування та безпеки їх для здоров'я людини, що й зумовило вибір об'єкта дослідження [3–8, 23].

Математичне моделювання продуктивності посівів зернових виконано на прикладі вівса голозерного. Для дослідження фотосинтетичних процесів у цих сільськогосподарських рослинах була проведена серія дослідів, що виконувалась за розробленою схемою та складалась з двох груп дослідів, всього 18 варіантів.

Перша група дослідів передбачала, що насіння не оброблене перед посівом регулятором росту:

1. Без препаратів і ручних прополовань (контроль I).
2. Без препаратів + ручні прополовання (контроль II).
3. Лонтрел 300 0,16 мл/га.
4. Лонтрел 300 0,41 мл/га.
5. Лонтрел 300 0,66 мл/га.
6. Альбіт 40 мл/га.
7. Лонтрел 300 0,16 мл/га + Альбіт 40 мл/га.
8. Лонтрел 300 0,41 мл/га + Альбіт 40 мл/га.
9. Лонтрел 300 0,66 мл/га + Альбіт 40 мл/га.

Друга група дослідів: насіння оброблене перед посівом регулятором росту Альбіт 40 мл/т (Фон):

10. Фон + Без препаратів і ручних прополовань (контроль I).
11. Фон + Без препаратів + ручні прополовання (контроль II).
12. Фон + Лонтрел 300 0,16 мл/га.
13. Фон + Лонтрел 300 0,41 мл/га.
14. Фон + Лонтрел 300 0,66 мл/га.
15. Фон + Альбіт 40 мл/га.
16. Фон + Лонтрел 300 0,16 мл/га + Альбіт 40 мл/га.
17. Фон + Лонтрел 300 0,41 мл/га + Альбіт 40 мл/га.
18. Фон + Лонтрел 300 0,66 мл/га + Альбіт 40 мл/га.

Результуючим показником накопичення сухої речовини в рослині є чиста продуктивність фотосинтезу (ЧПФ) – маса сухої речовини, що синтезувалась за певний проміжок часу, в перерахунку на одиницю площі листків під час вегетаційного періоду. Показник ЧПФ виражає продуктивну здатність до фотосинтезу одиниці площі листової поверхні за певний інтервал часу. ЧПФ знаходиться в прямій залежності від урожайності, що в свою чергу дозволяє встановити потенціал продуктивності того чи іншого сорту за різних умов та способів вирощування.

Враховуючи особливості досліджуваних процесів, наявність причинно-наслідкових зв'язків між факторами, було обрано ймовірно-статистичні моделі у формі мереж Байеса. Оскільки результуючим показником продуціонального процесу є чиста продуктивність фотосинтезу, саме цей показник визначено цільовою змінною при побудові мережі Байеса. Показниками, які характеризують процес фотосинтезу і використані при побудові моделі, є хлорофіли  $a$  і  $b$ , площа листя, маса сухих речовин та чиста продуктивність фотосинтезу. Норми внесення препаратів розраховували на відповідну площу з врахуванням норми витрати води 300 л/га. Повторність дослідів – триразова. Аналізи в досліді виконували на третю і п'яту добу після внесення препаратів. Вегетаційний дослід проводили в суворо контрольованих умовах згідно з методикою З.І. Журбицького [24]. Суму хлорофілів  $a+b$ , вміст хлорофілів  $a$  і  $b$  та каротиноїдів визначали у 100% ацетоні за допомогою

спектрофотометра за методикою з використанням для розрахунків формул D. Wettstein [25], визначення маси сухих розчинних речовин [26].

Для побудови топології мережі Байєса з-поміж інших методів було обрано метод PC [27], який показав найкращі результати. Побудова структури мережі Байєса виконувалась автоматизовано із використанням програмного забезпечення Genie 2.0 [28]. Параметри мережі, задані у налаштування даного програмного забезпечення: максимальна кількість батьківських вершин, що може мати мережа Байєса – 8 (налаштування «Max Adjacency Size»), рівень значущості для тесту на умовну незалежність між вершинами – 0,05 (налаштування «Significance Level»), максимальний час виділений на роботу алгоритму, якщо значення дорівнює 0, то обмежень по часу немає (налаштування «Max Time (seconds)»).

Алгоритм PC [27, 29] є модифікацією алгоритму SGS [30]. Обидва алгоритми засновані на  $d$ -сепарабельності та послідовному переборі різноманітних комбінацій вершин із урахуванням обмежень, для виявлення причин. Час виконання PC-алгоритму є експоненційним, тому він ефективний лише для невеликої кількості вершин.

В основу роботи алгоритму покладений тест на умовну незалежність. В якості навчального набору даних використовується множина екземплярів  $D$ , що містить множину змінних  $V$ . Для тесту на умовну незалежність  $I(x, y | S)$ , із заданим рівнем значущості  $0 < \alpha < 1$  та порядком впорядкування  $(V)$ , на множині змінних  $V$ , послідовність дій:

- побудувати повний ненаправлений граф за змінними-вершинами  $V$ ;
- для всіх суміжних вузлів  $x$  і  $y$  знайти розподілення, спочатку використовуючи впорядкування за зменшенням, а потім за збільшенням значень умовної незалежності між  $x$  та  $y$ . Значення умовної незалежності  $I(x, y | S)$  підтверджується тоді, і тільки тоді, коли всі змінні в  $S$  є суміжними з  $x$  і  $y$ ;
- якщо значення умовної незалежності між  $x$  і  $y$  виявлене та підтверджено, тоді відповідний зв'язок між вершинами  $x$  і  $y$  видаляється. Послідовність перевірки на умовну незалежність задається порядком  $V$ ;
- для кожної трійки вершин  $(x, y, z)$ , таких, що  $x$  суміжне із  $y$ , а  $y$  в свою чергу суміжне з  $z$ , але при цьому  $x$  не суміжне із  $z$ , то зв'язок між змінними  $x - y - z$  задається направленим  $x \rightarrow y \leftarrow z$  тоді і тільки тоді, коли  $y$  не належить множині  $S$ , що розділює  $x$  і  $z$  на попередньому другому кроці;
- вказані дії повторюють, до тих пір, доки не залишиться дуг, що можуть бути направлені, при цьому не повинно бути циклів.

Інформаційна технологія, представлена на рис. 2, містить інструменти інтелектуального аналізу даних, має гнучку модульну структуру та може застосовуватись окремо та в складі інших інформаційно-аналітичних систем.

В результаті побудови математичних моделей для дослідження фотосинтезу отримано ймовірісно-статистичну модель у формі мережі Байєса, яка описує сумісний вплив рострегуляторів та гербіцидів на урожайність вівса голозерного. Представлена модель дозволяє виявити потенційні можливості щодо підвищення екологічності рослинництва за рахунок зменшення доз гербіцидів та регуляторів росту за сумісного їх використання.

Отримана мережа Байеса представлена на рис. 3. Похибка помилкової класифікації дорівнює 20%.

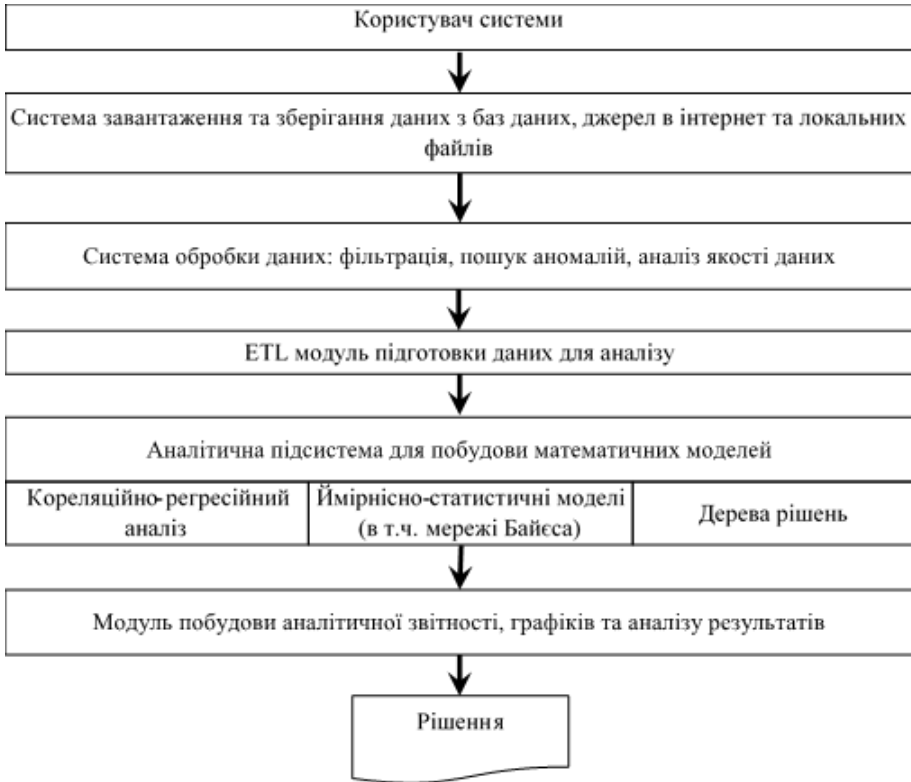


Рисунок 2. Схема пропонованої інформаційної технології

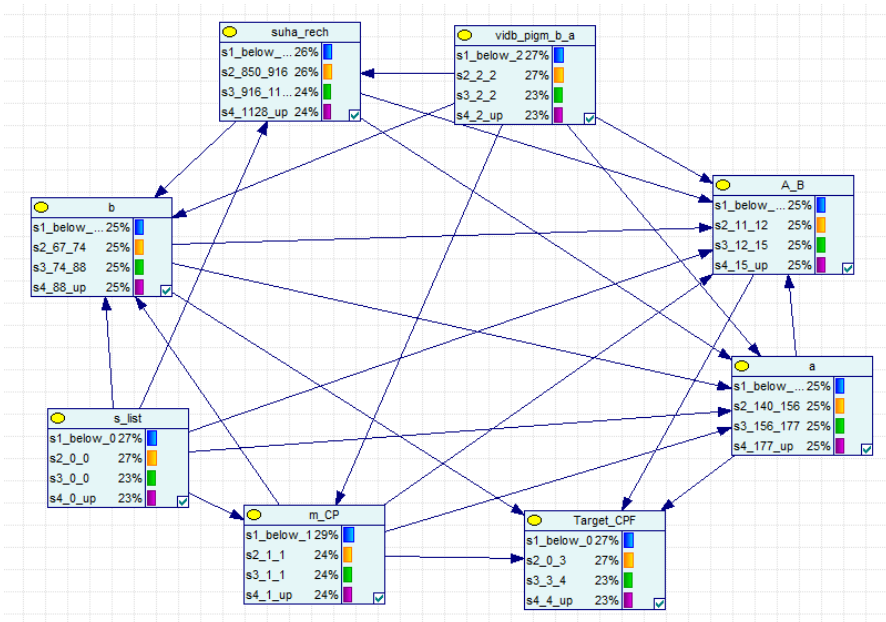


Рисунок 3. Мережа Байеса

Таблиця 1. Позначення змінних, використаних при побудові мережі Байєса

Назва	Позначення	Одиниці виміру
Показник чистої продуктивності фотосинтезу	CPF	г/м <sup>2</sup>
Вміст хлорофілу А	А	мг/г сирової маси
Вміст хлорофілу В	В	мг/г сирової маси
Площа листя	s_list	м <sup>2</sup>
Маса сухої речовини	m_CP	г
Вміст сухої речовини	suha rech	%
Відношення пігментів	vidb_pigm_a_b	б/р

Повна спільна ймовірність побудованої мережі Байєса (рис. 3) обчислюється за формулою:

$$P(\text{Target CPF, A B, vidb pigm b, a, a, b, suha rech, s list, m CP}) = P(\text{Target CPF} \mid \text{a, b, s list, m CP}) \cdot P(\text{m CPF} \mid \text{vidv pigm b a, suha rech, s list, m CP}) \cdot P(\text{m CP} \mid \text{vidb pigm b a, s list}) \cdot P(\text{s list}) \cdot P(\text{b} \mid \text{vidb pigm b a, suha rech, s list, m CP}) \cdot P(\text{suha rech} \mid \text{vidb pigm b a, s list, m CP}) \cdot P(\text{vidb pigm b a}) \cdot P(\text{A B} \mid \text{Target CPF, vidb pigm b a, b suha rech, s list, m CP}) \cdot P(\text{a} \mid \text{vidb pigm b a, b, suha rech, list, m CP}).$$

Для обчислення значень умовних ймовірностей цільової змінної, формула Байєса для побудованої топології мережі має вигляд:

$$P(\text{Target CPF} \mid \text{a, b, s list, m CP}) = \frac{P(\text{Target CPF, a, b, s list, m CP})}{P(\text{a, b, s list, m CP})},$$

де знаменник має вигляд:

$$P(\text{a, b, s list, m CP}) = P(\text{a} \mid \text{vidb pigm b a, b, suha rech, s list, m CP}) \cdot P(\text{b} \mid \text{vidb pigm b a, suha rech, s list, m CP}) \cdot P(\text{s list}) \cdot P(\text{m CP} \mid \text{vidb pigm b a, s list}).$$

На основі результатів моделювання побудована множина сценаріїв, представлена в табл. 2.

Таблиця 2. Сценарії зміни урожайності вівса голозерного на основі побудованої мережі Байєса

Номер сценарію	Сума хлорофілів А і В (А_В)	Маса сухої речовини (m_CP)	Показник чистої продуктивності фотосинтезу (CPF)
1	Збільшення на 15%	Збільшення на 20%	Збільшення на 18%
2	Збільшення на 20%	Збільшення на 15%	Збільшення на 10%
3	Збільшення на 15%	Залишається незмінним	Збільшення на 5%

Найкращим є сценарій номер 1, коли за збільшення суми хлорофілів  $a$  і  $b$ , відбувається збільшення маси сухої речовини та збільшення показника чистої продуктивності фотосинтезу, що є одним з важливих показників асиміляційної діяльності посівів сільськогосподарських культур.

Отже, результати моделювання підтверджують результати лабораторних досліджень дії гербіциду Лонтрел 300 як окремо, так і в комплексі з PPP Альбіт. При підвищенні норми застосування гербіциду у суміші з регулятором росту рослин без передпосівної обробки насіння PPP Альбіт, простежується зниження вмісту хлорофілів  $a$  і  $b$  та їх суми в листках вівса голозерного, що є наслідком підвищення рівня пероксидного окислення ліпідів у рослинах, що можливо призводить до гальмування синтезу хлорофілу, його руйнування (фотоокиснення). За сумісного ж використання гербіциду та регулятора росту у рослинах вівса голозерного з передпосівною обробкою насіння PPP Альбіт, простежується збільшення рівня хлорофілів  $a$  і  $b$  та їх суми в листках вівса голозерного, що корелює з чистою продуктивністю фотосинтезу рослин вівса голозерного та масою сухої речовини, у результаті підвищення інтенсивності процесу фотосинтезу. Сумісне внесення гербіциду з регулятором росту підсилює функціонування основних захисних систем вівса голозерного, що виражається у зростанні вмісту в листках вівса хлорофілів  $a$  і  $b$  та збільшенні чистої продуктивності фотосинтезу, що призводить до накопичення більшої маси сухої речовини та загалом врожайності. Тобто, моделюючи співвідношення гербіцид-регулятор росту, можна впливати на перебіг процесів, що відбуваються в рослинах у період їх вегетації, тим самим програмуючи майбутні врожаї.

## Висновки

Завдяки властивостям гнучкості та інтегрованості дана розробка може бути використана у інформаційно-аналітичних системах, системах підтримки прийняття рішень у аграрному секторі на будь-якому з етапів її впровадження. Комп'ютерні модулі, призначені для аналізу, моделювання вибраних процесів, прогнозування, поглибленої обробки даних, можуть використовуватися як поодиночі, так і комплексно; вони можуть бути реалізовані як в потужних інструментальних системах, таких як SAS та SPSS, так і в інших інструментальних середовищах.

У подальших дослідженнях для програмування урожайності доцільно застосовувати комплекс моделей, наприклад такий, до складу якого входять регресійні моделі, мережі Байєса, дерева рішень, нейронні мережі, інші методи інтелектуального аналізу даних, а крім того, виконати апробацію запропонованої методики для програмування урожаю різних сільськогосподарських культур, дослідивши як внутрішні, так і зовнішні чинники.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бідюк, П.І., Терент'єв, О.М., Присянкін-Жарова, Т.І., & Ефендієв, В.В. (2017). Прогнозне моделювання нелінійних нестационарних процесів у рослинництві з використанням інструментів SAS Enterprise Miner. *Наукові вісті НТУУ КІП*, 1, 24–36. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.1.87423>

2. Westra, E.P., Shaner, D.L., Westra, P.H., & Chapman, P.L. (2014). Dissipation and Leaching of Pyroxasulfone and S-Metolachlor. *Weed Technology*, 28 (1), 72–81. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00047.1>
3. Gulner, G., Kömives, T., & Rennenberg, H. (2001). Enhanced tolerance of transgenic poplar plants overexpressing  $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase towards chloroacetanilide herbicides. *The Journal of Experimental Botany*, 52 (358), 971–979. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.358.971>
4. Foyer, C.H., & Noctor, G. (2009). Redox regulation in photosynthetic organisms: Signaling, acclimation and practical implications. *Antioxidants and Redox Signaling*, 11, 862–905. <https://doi.org/10.1089/ars.2008.2177>
5. Заболотна, А.В., Заболотний, О.І., Розборська, Л.В., Жижак, І.Д., & Даценко, А.А. (2021). Вміст пігментів і чиста продуктивність фотосинтезу кукурудзи за використання регуляторів росту рослин. *Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Агронія і біологія»*, 4 (46), 9–15. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.4.2>
6. Wang, G.; Zhuang, L.; Mo, L.; Yi, X.; Wu, P.; & Wu, X. (2023). BAG: A Linear-Nonlinear Hybrid Time Series Prediction Model for Soil Moisture. *Agriculture*, 13 (2), 379. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020379>
7. Ma, D., Maki, H., Neeno, S., Zhang, L., Wang, L., & Jin, J. (2020). Application of non-linear partial least squares analysis on prediction of biomass of maize plants using hyperspectral images. *Biosystems Engineering*, 200, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.002>
8. Paine, C.E.T., Marthews, T.R., Vogt, D.R., Purves, D., Rees, M., Hector, A., & Turnbull, L.A. (2012). How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 245–256. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00155.x>
9. KPMG. Retrieved from <https://kpmg.com/ua/uk/home.html>
10. EOS Data Analytics. Retrieved from <https://eos.com/uk/>
11. Інформаційна технологія моніторингу вирощування озимих культур (Програмування врожаю озимих сільськогосподарських культур). <https://scp.knu.ua/ua/kataloh-innovatsiinykh-proektiv-3/361-informatsiina-tekhnohiiia-monitorynhu-vyroshchuvannia-ozymykh-kultur-prohramuvannia-vrozhaiu-ozymykh-silskohospodarskykh-kultur>
12. Проект АгроТехінтелект. Retrieved from <https://www.ndipvt.com.ua/agrotehintel.html>
13. Згуровський, М.З., Бідюк, П.І., Терентьев, О.М., & Просянкін-Жарова, Т.І. (2015). *Байєсівські мережі у системах підтримки прийняття рішень*. Київ: ТОВ «Видавниче Підприємство «Едельвейс».
14. de Carvalho Pinto, Nicolai, M., Rodrigues, Ferreira R. et al. (2009). Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages sci. agric. (piracicaba, braz.). *Scientia Agricola*, 66 (1), 136-142. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100020>
15. Лобода, О.М., & Худік, Н.Д. (2021). Використання експертних оцінок для визначення пріоритетних напрямів впровадження цифрових технологій в агробізнесі. *АГРОСВІТ*, 4, 38–44. <https://doi.org/10.32702/2306&6792.2021.4.38>
16. Коковіхін, С.В., & Коваленко, В.П. (2019). Математичне моделювання рівнів продуктивності багаторічних бобових культур в умовах Лісостепу України. *Таврійський науковий вісник*, 108, 39–45. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.108.6>
17. Бондаренко, Л.В. (2017). Впровадження нових інформаційних технологій у професійну діяльність агронома. *Наукова праця. Педагогіка*, 281 (293), 47–53.
18. Pearl, J. (2000). *Causality: models, reasoning, and inference*. Cambridge University Press.
19. Jensen, F.V. (2001). *Bayesian networks and decision graphs*. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3502-4>
20. Spiegelhalter, D., Dawid, P., Lauritzen, S. and Cowell, R. (1993). Bayesian analysis in expert systems. *Statistical Science*, 8 (3), 219–247.

21. Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Terentiev, O., & Prosyankina-Zharova, T. (2019). *Decision Support Systems for Modelling, Forecasting and Risk Estimation*. Riga: LAP Lambert Academic Publishing.
22. Lauritzen, S.L. and Spiegelhalter, D.J. (1988). Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal Royal Statistics Society, series B (Methodology)*, 50 (2), 157–194.
23. Карпенко, В.П., & Просянкін, Д.І. (2015). Ліпопероксидаційні та антиоксидантні процеси в рослинах вівса голозерного за дії біологічно активних речовин. *Вісник Уманського Національного університету садівництва*, 1, 47–50.
24. Грицаєнко, З.М. Грицаєнко, А.О., & Карпенко, В.П. (2003). *Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів*. Київ: ЗАТ «Нічлава».
25. Pateiro, M., Domínguez, R., Muneke, P.E.S., Nieto, G., Bangar, S.P., Dhama, K., Lorenzo, J.M. (2023). Bioactive Compounds from Leaf Vegetables as Preservatives. *Foods*, 12 (3), 637. <https://doi.org/10.3390/foods12030637>
26. Визначення розчинних сухих речовин рефрактометричним методом (ISO 2173:2003 IDT): ДСТУ ISO 2173:2007 (2007). Retrieved from <http://csm.kiev.ua/nd/nd.php?b=1&l=24791>
27. Spirtes, P., Glymour, C., & Scheines, R. (1993). *Causation, Prediction and Search. Part of the book series: Lecture Notes in Statistics (LNS, vol. 81)*. Berlin: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2748-9>
28. Genie 2.0. Retrieved from <https://www.bayesfusion.com/genie/>
29. Kelangath, S., Das, P.K., Quigley, J., & Hirdaris, S.E. (2012). Risk analysis of damaged ships - A data-driven Bayesian approach. *Ships and Offshore Structures*. 7 (3), 333-347. <https://doi.org/10.1080/17445302.2011.592358>
30. Spirtes, P., Glymour C., & Scheines, R. (1991). From probability to causality. *Philosophical Studies*, 64, 1–36. <https://doi.org/10.1007/BF00356088>

Стаття надійшла до редакції 29.08.2023 і прийнята до друку після рецензування 01.12.2023

## REFERENCES

1. Bidjuk, P.I., Terent'jev, O.M., Prosjankina-Zharova, T.I., & Efendijev, V.V. (2017). Prognose modeljuvannja nelinejnijnh nestacionarnyh procesiv u roslynnjctvi z vykorystannjam instrumentiv SAS Enterprise Miner. *Naukovi visti NTUU KPI*, 1, 24-36 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/1810-0546.2017.1.87423>
2. Westra, E.P., Shaner, D.L., Westra, P.H., & Chapman, P.L. (2014). Dissipation and Leaching of Pyrooxasulfone and S-Metolachlor. *Weed Technology*, 28(1), 72–81. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00047.1>
3. Gulner, G., Kömives, T., & Rennenberg, H. (2001). Enhanced tolerance of transgenic poplar plants overexpressing  $\gamma$ -glutamylcysteine synthetase towards chloroacetanilide herbicides. *The Journal of Experimental Botany*, 52(358), 971–979. <https://doi.org/10.1093/jexbot/52.358.971>
4. Foyer, C.H., & Noctor, G. (2009). Redox regulation in photosynthetic organisms: Signaling, acclimation and practical implications. *Antioxidants and Redox Signaling*, 11, 862–905. <https://doi.org/10.1089/ars.2008.2177>
5. Zabolotna, A.V., Zabolotnyj, O.I., Rozbors'ka, L.V., Zhyljak, I.D., & Dacenko A.A. (2021). Vmist pigmentiv i chysta produktyvnist' fotosyntezy kukurudzy za vykorystannja reguljatoriv rostu roslyn. *Visnyk Sums'kogo nacional'nogo agrarnogo universytetu Serija «Agronomija i biologija»*, 4(46), 9-15 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32845/agrobio.2021.4.2>
6. Wang, G., Zhuang, L., Mo, L., Yi, X., Wu, P., & Wu, X. (2023). BAG: A Linear-Nonlinear Hybrid Time Series Prediction Model for Soil Moisture. *Agriculture*, 13(2), 379. <https://doi.org/10.3390/agriculture13020379>



7. Ma, D., Maki, H., Neeno, S., Zhang, L., Wang, L., & Jin, J. (2020). Application of non-linear partial least squares analysis on prediction of biomass of maize plants using hyperspectral images. *Biosystems Engineering*, 200, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.09.002>
8. Paine, C. E. T., Marthews, T. R., Vogt, D. R., Purves, D., Rees, M., Hector, A., & Turnbull, L. A. (2012). How to fit nonlinear plant growth models and calculate growth rates: an update for ecologists. *Methods in Ecology and Evolution*, 3, 245–256. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00155.x>
9. KPMG. Retrieved from <https://kpmg.com/ua/uk/home.html>
10. EOS Data Analytics. Retrieved from <https://eos.com/uk/>
11. Інформаційна технологія моніторингу виробництва озимих культур (Програмування врожайності озимих сільськогосподарських культур). Retrieved from <https://scp.knu.ua/ua/katalog-innovatsiinykh-proektiv-3/361-informatsiina-tehnolohiia-monitorynhu-vyroshchuvannia-ozymykh-kultur-prohramuvannia-vrozhaiu-ozymykh-silskohospodarskykh-kultur> [in Ukrainian].
12. Proekt AgroTehintelekt. Retrieved from <https://www.ndipvt.com.ua/agrotehintel.html> [in Ukrainian].
13. Zgurovs'kyj, M.Z., Bidjuk, P.I., Terent'jev, O.M., & Prosjankina-Zharova T.I. (2015). *Bajjesiv's'ki merezhi u systemah pidtrymky pryjnjattja rishen'*. Kyi'v: TOV «Vydavnyche Pidpryjemstvo «Edel'vejs» [in Ukrainian].
14. de Carvalho, P., Nicolai, M., Rodrigues, Ferreira, R. et al. (2009). Herbicide selectivity by differential metabolism: considerations for reducing crop damages sci. agric. (piracicaba, braz.). *Scientia Agricola*, 66(1), 136-142. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000100020>
15. Loboda, O.M., & Hudik, N.D. (2021). Vykorystannja ekspertnyh ocinok dlja vyznachennja pryoritetnyh naprjamiv vprovadzhennja cyfrovych tehnologij v agrobiznesi. *Agrosvit*, 4, 38-44 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32702/2306&6792.2021.4.38>
16. Kokovihin, S.V., & Kovalenko, V.P. (2019). Matematyčne modeljuvannja rivniv produktyvnosti bagatorichnyh bobovyh kultur v umovah Lisostepu Ukrai'ny. *Tavrijs'kyj naukovyj visnyk*, 108, 39-45 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.108.6>
17. Bondarenko, L.V. (2017). Vprovadzhennja novyh informacijnyh tehnologij u profesijnu dijalnist' agronoma. *Naukova pracja. Pedagogika*, 281 (293), 47-53 [in Ukrainian].
18. Pearl, J. (2000). *Causality: models, reasoning, and inference*. Cambridge University Press.
19. Jensen, F.V. (2001). *Bayesian networks and decision graphs*. New York: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3502-4>
20. Spiegelhalter, D., Dawid, P., Lauritzen, S., & Cowell, R. (1993). Bayesian analysis in expert systems. *Statistical Science*, 8 (3), 219–247.
21. Trofymchuk, O., Bidiuk, P., Terentiev, O., & Prosyankina-Zharova, T. (2019). *Decision Support Systems for Modelling, Forecasting and Risk Estimation*. Riga: LAP Lambert Academic Publishing.
22. Lauritzen, S.L., & Spiegelhalter, D.J. (1988). Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *Journal Royal Statistics Society, series B (Methodology)*. 50 (2), 157-194.
23. Karpenko, V.P., & Prosjankin, D.I. (2015). Lipoperoksydacijni ta antyoksydantni procesy v roslynah vivsa golozernogo za dii' biologichno aktyvnyh rehovyn. *Visnyk Umans'kogo Nacional'nogo universytetu sadivnyctva*, 1, 47-50 [in Ukrainian].
24. Grycajenko, Z.M. Grycajenko, A.O., & Karpenko, V.P. (2003). Metody biologichnyh ta agrohimičnyh doslidzen' roslyn i g'runtiv. Kyi'v: ZAT «Nichlava» [in Ukrainian].
25. Pateiro, M., Domínguez, R., Munekata, P.E.S., Nieto, G., Bangar, S.P., Dhama, K., & Lorenzo, J.M. (2023). Bioactive Compounds from Leaf Vegetables as Preservatives. *Foods*, 12 (3), 637. <https://doi.org/10.3390/foods12030637>

26. Vyznachennja rozchynnyh suhyh rehovyn refraktometrychnym metodom (ISO 2173:2003 IDT): DSTU ISO 2173:2007 (2007). Retrieved from <http://csm.kiev.ua/nd/nd.php?b=1&l=24791> [in Ukrainian].
27. Spirtes, P., Glymour, C., & Scheines, R. (1993). *Causation, Prediction and Search. Part of the book series: Lecture Notes in Statistics* (LNS, vol. 81). Berlin: Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-2748-9>
28. Genie 2.0. Retrieved from <https://www.bayesfusion.com/genie/>
29. Kelangath, S., Das, P.K., Quigley, J., & Hirdaris, S.E. (2012). Risk analysis of damaged ships - A data-driven Bayesian approach. *Ships and Offshore Structures*. 7 (3), 333-347. <https://doi.org/10.1080/17445302.2011.592358>
30. Spirtes, P., Glymour C., & Scheines, R. (1991). From probability to causality. *Philosophical Studies*, 64, 1–36. <https://doi.org/10.1007/BF00356088>

*The article was received 29.08.2023 and was accepted after revision 01.12.2023*

**Терентьев Александр Николаевич**

доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник відділу прикладної інформатики, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4288-1753> **e-mail:** o.terentiev@gmail.com

**Просянкін Денис Іванович**

аспірант, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

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

ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-4402-6921> **e-mail:** dipruman@ukr.net

UDC 004.89 : 004.032.26 : 519.651 : 532.5.013.12 : 627.152

**Yaroslav Khodnevych**, PhD (Engineering), Research Scientist

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5510-1154> **e-mail:** ya.v.khodnevych@gmail.com

**Dmytro Stefanyshyn**, D. S. (Engineering), Senior Research Scientist

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** d.v.stefanyshyn@gmail.com

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

## **DO WE NEED A MORE SOPHISTICATED MULTILAYER ARTIFICIAL NEURAL NETWORK TO COMPUTE ROUGHNESS COEFFICIENT?**

**Abstract.** *Artificial neural networks (ANNs) are one of the most rapidly growing fields of soft computing. Along with deep learning, they are currently the most widely used machine learning techniques. Artificial neural networks are especially suitable for problem-solving where a researcher deals with incomplete data sets and no algorithms or specific sets of rules to be followed.*

*This article deals with a case of comparison of several modifications of neural networks that may be applied to compute Chézy's roughness coefficient. Neural network modelling is often started with one hidden layer. Having even one hidden layer, a neural network presents a powerful computing system to give good results. If it is necessary, the number of hidden layers may increase. Usually, two or three hidden layers of neurons are used. Diverse activation functions may also apply. The article aims to explore the necessity of developing sophisticated multilayer artificial neural networks to compute Chézy's roughness coefficient.*

*Under the study, the following modifications of the neural network computing Chézy's roughness coefficient were considered and analysed: (1) Application of two hidden layers of neurons; (2) Application of three hidden layers of neurons; (3) Use of a dropout algorithm for training neural networks by randomly dropping units during training to prevent their co-adaptation; (4) Apart from the sigmoid (logistic) activation function, the use of other artificial neuron transfer functions – hyperbolic tangent (tanh) and rectifying activation function (ReLU).*

*The training and testing of the considered neural network options were carried out using the actual hydro-morphological and hydrological data related to the channel section on the Dnieper River (downstream of Kyiv), the Desna River section near Chernihiv, and the Pripjat River section near the town of Turiv. The Python object-oriented programming environment was applied to build and train the neural networks. The test results confirm the acceptability and sufficiency of computing the Chézy roughness coefficient using the ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. The formation of a qualitative set of training data, as well as data arrangement and choosing a relevant computing model based on empirical knowledge, are, as concluded, among more actual issues than creating more sophisticated neural networks.*

**Keywords:** *activation functions, artificial neural networks, Chézy's roughness coefficient, comparison, dropout algorithm, hidden layers, modifications, neurons*

**<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.170-182>**

## 1. Introduction

Artificial neural networks (ANNs, neural networks, neural computing) present one of the most popular fields of so-called soft computing that deals with approximate models and using inexact solutions [1-5]. Soft computing is not a single method of solving diverse tasks and problems using computing. It is a holistic approach that uses probabilistic models, multivalued and fuzzy logic, neural networks, and evolutionary (genetic) algorithms (Fig. 1) and their hybridizations [5-7].

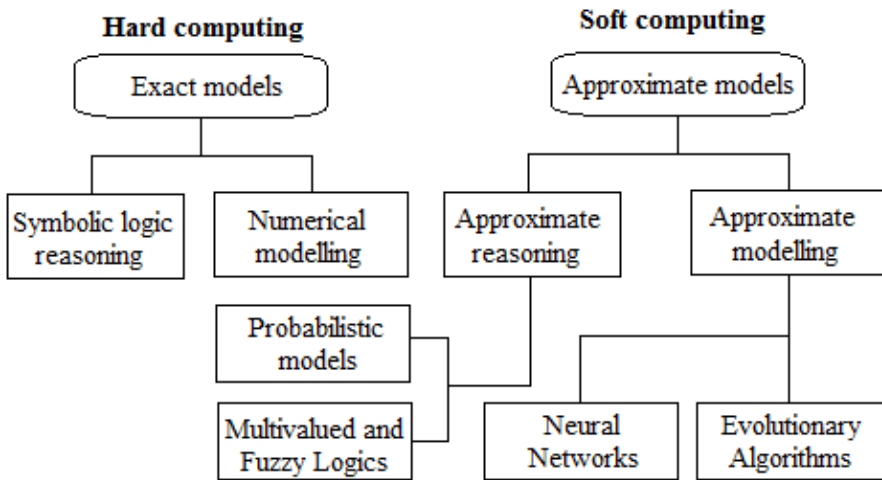


Fig. 1. Approaches to solving problems using computing

According to L. Zadeh [1], the point of departure in soft computing is the thesis that precision and certainty carry a cost and that computation, reasoning, and decision-making should exploit – wherever possible – the tolerance for imprecision and uncertainty. Soft computing is a flexible tool for mathematical modelling. Being a flexible tool for modelling and forecasting real-world phenomena [5], soft computing is used in various fields of human activity, such as economy, environment [5, 8, 9], engineering, science, medicine, etc. [1, 10-13].

Neural computing is one of the most rapidly growing fields of soft computing. Especially, ANNs are highly suitable for solving complex problems where there are no algorithms or specific sets of rules to be followed. Along with deep learning, they are currently the most widely used machine learning techniques [14-16]. Neural computing is developed as an integral part of artificial intelligence and data science [15, 17, 18]. The most typical application areas of ANNs are pattern and data recognition, image and speech processing and recognition, machine translation, and medical diagnosis. Essentially, ANNs have become a successful forecasting method used in diverse applications [8-10, 18-20]. It is because ANNs have several advantages compared with other forecasting methods [2, 3, 18-20]: results depend on the accuracy of available data; ANNs deal with incomplete data sets; neural computing is an adaptive method; ANNs can learn without any prior assumption; they are non-linear models with good generalization ability.

This article deals with the case of comparison of several modifications of ANNs to compute the Chézy coefficient. Chézy's roughness coefficient is a hydraulic integral empirical characteristic controlling the hydraulic resistance to open flows in river channels. The challenge is that it may not be determined directly using field measurements or experimentally. To determine the Chézy coefficient, many empirical formulas have been developed [21], usually dealing with incomplete data sets. As practice shows, the appropriate formula choosing can become a challenge for researchers. Therefore, in [22], we proposed to solve the problem using an artificial neural network. It was a multilayer perceptron of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. That network showed good predictive skills in the condition of correct studying of the subject area and relevant input data arrangements [22].

As known, the basic structure of a multilayer ANN (a multilayer perceptron) consists of an input layer, one or more hidden layers, an output layer, an activation function and a set of weights and biases. In a fully connected neural network, each neuron in one layer is connected to all neurons in the next layer. Neurons of the input layer in such networks transmit input signals to the first hidden layer without converting them. In hidden neurons, sequentially, layer by layer, there is a nonlinear conversion of signals. Each network neuron produces a weighted sum of its inputs, passes this value through the activation function and gives the output value. Signals from the last hidden layer arrive at the neurons of the output layer, which eventually form the ANN response [14, 19, 20, 22-24].

The modelling is often started with one hidden layer [14]. Having even one hidden layer, the ANN is a powerful computing system [25], giving good results [22]. If it is necessary, the number of hidden layers may increase. Usually, two or three hidden layers of neurons are used [14, 23-26]. Diverse activation functions may also be applied. That is how researchers try to improve the ANN performance. *This article aims* to answer the question of whether we need to develop a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute Chézy's roughness coefficient within the computing model that was proposed in [22].

## **2. Computing model, the basic structure and considered modifications of the neural network computing Chézy's roughness coefficient**

### **2.1. Computing model and the basic structure of the ANN computing Chézy's roughness coefficient**

In [22], the following computing model was proposed for calculating the Chézy coefficient  $C$  within the fully connected ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function:

$$C = f(x_1, x_2), \tag{1}$$

$$x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}, x_2 \in \{h, R\}, \tag{2}$$

where  $n$  is the Gauckler-Manning roughness coefficient;  $\Delta$  is the height of protrusions of roughness;  $S_f$  is the water surface slope;  $B$  is the average flow width;  $h$  is the average flow depth;  $R$  is the hydraulic radius. It was assumed that

multicollinearity between the hydro-morphological parameters  $n$ ,  $S_f$ ,  $B$ ,  $\Delta$ ,  $h$ , and  $R$  could be neglected.

The basic structure of the ANN proposed in [22] for computing the Chézy coefficient  $C$  consists of two input neurons, four hidden layer neurons, and one output layer neuron (Fig. 2).

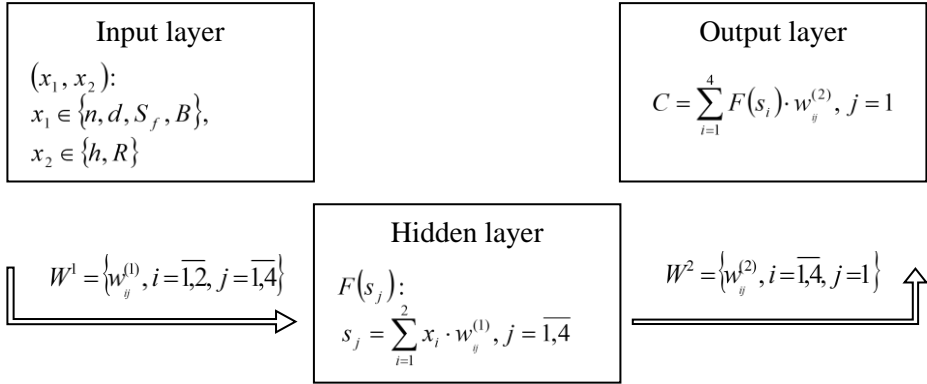


Fig. 2. Flow-chart showing the architecture of the ANN computing Chézy’s coefficient  $C$  according to [22]

The ANN uses a direct propagation network model with a linear source neuron [22]; the sigmoid (logistic) activation function is applied to the neurons of the hidden layer [14, 22]:

$$F(s) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot s}}, \tag{3}$$

and its first derivative

$$F'(s) = \beta \cdot F(s)(1 - F(s)), \tag{4}$$

where the parameter  $\beta$  influencing the steepness of the transition is equal to 1.

According to the ANN [22], receiving the  $(x_1, x_2)$  values, the input layer transmits them (without conversion) to the next layer of neurons using the weight matrix  $W^1 = \{w_{ij}^{(1)}, i = \overline{1,2}, j = \overline{1,4}\}$  containing the weight values  $w_{ij}^{(1)}$  of inputs for the hidden layer neurons. Afterwards, the hidden layer containing four neurons calculating the weighted sum  $s_j = \sum_{i=1}^2 x_i \cdot w_{ij}^{(1)}$  conducts this sum value through the activation function  $F(s_j)$ , and transmits the resulting value using the weight matrix  $W^2 = \{w_{ij}^{(2)}, i = \overline{1,4}, j = 1\}$  to the output layer. The weight matrix  $W^2$  contains the weight values  $w_{ij}^{(2)}$  of relationships of each hidden layer neuron with the output neuron. The output layer contains one neuron in which the weighted sum of its inputs is calculated, and Chézy’s coefficient  $C$  value is thereby determined.

## 2.2. Considered modifications of the ANN

Under the study, the following modifications of the neural network computing Chézy's roughness coefficient were considered and analysed:

- 1) Application of two hidden layers of neurons;
- 2) Application of three hidden layers of neurons;
- 3) Use of a dropout algorithm for training neural networks by randomly dropping units during training to prevent their co-adaptation [27];
- 4) Apart from the sigmoid (logistic) activation function (3), the use of other artificial neuron transfer functions (activation functions) – hyperbolic tangent (tanh) and rectifying activation function (ReLU – Rectified Linear Unit) [29].

Having the same S-shape, the hyperbolic tangent activation function (tanh) is very similar to the sigmoid (logistic) function (3).

The equation for tanh is:

$$F(s) = \tanh(s) = \frac{2}{1+e^{-2s}} - 1. \quad (5)$$

Its first derivative is:

$$F'(s) = 1 - F(s)^2. \quad (6)$$

Compared to the sigmoid function, the hyperbolic tangent activation function produces a more rapid rise in result values [15, 16, 28].

The ReLU function is the most commonly used activation function in deep learning models. The function returns 0 if it receives any negative input, but for any positive value  $s$  it returns that value back. The equation for ReLU is:

$$F(s) = \begin{cases} 0, & s < 0 \\ s, & s \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

The ReLU first derivative is:

$$F'(s) = \begin{cases} 0, & s < 0 \\ 1, & s \geq 0. \end{cases} \quad (8)$$

The sigmoid and hyperbolic tangent activation functions cannot be used in networks with many layers due to the vanishing gradient problem. The rectified linear activation function overcomes the vanishing gradient problem inhering, allowing models to learn faster and perform better [29].

## 3. Materials and methods

The training and testing of the considered neural network options were carried out using the actual hydro-morphological and hydrological data related to the channel section on the Dnieper River (downstream of Kyiv), the Desna River section near Chernihiv, and the Pripjat River section near the town of Turiv. The chosen river sites are characterized by a straight earthen channel with a simple cross-sectional shape and calm flow (the Froude number,  $Fr \ll 1$ ). The limits of change of

hydrological and hydro-morphological parameters are the following [22]: the water discharge  $Q = 48.8 \div 3665.0 \text{ m}^3/\text{s}$ ; the average flow velocity  $V = Q/A = 0.336 \div 0.968 \text{ m/s}$ , where  $A$  is the cross-sectional area of the flow ( $\text{m}^2$ ); the water surface slope  $S_f = 0.000036 \div 0.00016$ ; the average flow depth  $h = 1.0 \div 6.2 \text{ m}$ ; the average flow width  $B = 122.0 \div 611.0 \text{ m}$ ; the Manning roughness coefficient  $n = 0.027 \div 0.045 \text{ (s/m}^{1/3}\text{)}$ ; the identified (observed) Chézy roughness coefficient  $C_o = 27.0 \div 43.7 \text{ (m}^{1/2}/\text{s)}$ . The input data is summarised in Table 1.

Table 1. Input data used in the training and testing of the considered neural network options

Rivers, channel sections	Hydrological and hydro-morphological parameters:						
	$Q_o$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$A$ ( $\text{m}^2$ )	$B$ ( $\text{m}$ )	$h$ ( $\text{m}$ )	$S_f \cdot 10^3$	$n$ ( $\text{s/m}^{1/3}$ )	$C_o$ ( $\text{m}^{1/2}/\text{s}$ )
Dnieper, downstream of Kyiv (training)	657.4	1956	575	3.4	0.046	0.045	27.0
	1123	2403	586	4.1	0.054	0.040	31.4
	3665	3787	611	6.2	0.079	0.031	43.7
Dnieper, downstream of Kyiv (testing)	1763	2858	595	4.8	0.063	0.036	35.6
	2601	3320	604	5.5	0.071	0.033	39.7
Desna, Chernihiv (training)	188	501.8	125	4.0	0.036	0.041	31.1
	249.4	580	129	4.5	0.040	0.040	32.2
	403.7	742.4	135	5.5	0.046	0.039	34.2
	497.5	826.3	138	6.0	0.049	0.038	35.1
Desna, Chernihiv (testing)	321.2	660.3	132	5.0	0.043	0.039	33.3
Pripyat, Turiv (training)	48.8	122	122	1.0	0.16	0.032	31.6
	89	195.4	130	1.5	0.128	0.033	32.9
	248.6	437.3	146	3.0	0.087	0.034	35.1
Pripyat, Turiv (testing)	136.3	273	136	2.0	0.109	0.033	33.8
	189.7	353.8	142	2.5	0.097	0.034	34.5

Training data samples consisted of normalized values of the characteristics obtained with uniform linear interpolation in the vicinity of the observed values of parameters. Numerical data were converted in such a way as to obtain their model values varying in the range between 0 and 1 [22]. The test cases observed values were not included in the training samples.

The Python object-oriented programming environment [23, 24, 30] was applied to build and train the considered options of the neural network. The software implementation of the computational algorithms is given in [31].

The weight coefficients of the considered ANN options were adjusted on a series of real case examples of  $(x_1, x_2)$  values in such a way as to achieve a reduction in the error between the predicted (computed)  $C_p$  and observed (reference)  $C_o$  estimates of Chézy's roughness coefficient  $C$ . The reference  $C_o$  values were calculated on actual data (Table 1) according to the Chézy formula:



$$C_o = \frac{Q_o}{A \cdot \sqrt{R \cdot S_f}}. \tag{9}$$

The initial values of the weight coefficients were set randomly, close to zero. At each iteration step (learning epoch), at the ANN entrance, training examples were input and the neural network outputs were computed. The obtained results were further compared with the reference values with error estimating. For the neurons of each hidden layer, the network error was calculated. The obtained error values were used to recalculate weight coefficients according to the inverse error propagation algorithm [14, 23, 24]. Then, the transition to the next learning epoch was performed. When the required number of epochs was fulfilled, or the computational error amounted to an acceptable value, the algorithm was stopped.

The testing of the considered ANN options was carried out according to the actual data of observations (Table 1), which were not used in the network training. The testing procedure consisted of a comparison of the actual (observed, gauged)  $Q_o$  and computed (predicted)  $Q_p$  water discharges:

$$Q_p = C_p \cdot A \sqrt{R \cdot S_f}, \tag{10}$$

where  $C_p$  is the predicted (computed using the ANN) Chézy coefficient value.

To assess the forecast (predictive) skill of the considered ANN options, the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (*NSE*) was used [32]:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^6 (Q_{o,i} - Q_{p,i})^2}{\sum_{i=1}^6 (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2}, \tag{11}$$

where  $Q_{o,i}$ ,  $Q_{p,i}$  are observed and predicted water discharges for a river channel section  $i$ ,  $i = \overline{1,6}$ ;  $\bar{Q}_o$  is the mean of the observed discharges  $Q_{o,i}$ .

#### 4. Results

In general, a multi-layer direct propagation neural network for computing the Chézy coefficient within the model (1) and (2) works as follows. The input layer receives the predictors ( $x_1, x_2$ ) values and transmits them without conversion to the next layer of neurons using the weight matrix  $W^1 = \{w_{ij}^{(1)}, i = \overline{1,2}, j = \overline{1,m}\}$  containing the weight values  $w_{ij}^{(1)}$  of inputs for all hidden layer neurons, where  $m$  is the number of artificial neurons in the hidden layer. The hidden layer containing neurons, each of which computes a weighted sum  $s_j = \sum_{i=1}^2 x_i \cdot w_{ij}^{(1)}$ ,  $j = \overline{1,m}$ , relating to its input data, conducts this sum value through the activation function  $y_j^{(1)} = F(s_j)$ , and transmits the obtained value to the next layer, etc. The weight matrix  $W^{\xi-1} = \{w_{ij}^{(\xi-1)}, i = \overline{1,m}, j = \overline{1}\}$  contains the value of the weight of connections of each neuron of the previously received layer with the original neuron, where  $\xi$  is the total number of layers of a multilayer ANN. For a neural network with two hidden layers,  $\xi = 4$ ; with three hidden layers,  $\xi = 5$ . The output layer contains

one neuron in which the weighted sum of its inputs is calculated, and Chézy's coefficient value is determined:  $C = \sum_{i=1}^m F(s_i) \cdot w_{ij}^{(\xi-1)}, j = 1$ .

The results of using different options of a multilayer neural network of direct propagation for calculating Chézy's coefficient within the computing model framework according to equations (1) and (2) are given in Tables 2, 3, and 4.

Table 2. Results of using different options for the number of hidden layers and neurons with the sigmoid activation function (learning factor is 0.002)

The number of:		Activation function	The number of learning epochs	Duration of calculations*, sec	$\bar{C}_p, m^{1/2}/s$
hidden layers	neurons $m$				
1	4	Sigmoid, $\beta = 1$	100	<1	34.1149
2	4		100	<1	34.1151
2	8		49	<1	34.1166
2	16		24	<1	34.1166
3	4		100	~1	34.1157
3	8		47	<2	34.1166
3	16		18	<2	34.1170

\*The duration of computing is conditional; it depends on the computer equipment's power

Table 3. Results of using different options for the number of hidden layers, neurons, and the different activation functions (learning factor is 0.002)

The number of:		Activation function	The number of learning epochs	Duration of calculations*, sec	$\bar{C}_p, m^{1/2}/s$
hidden layers	neurons $m$				
1	4	Sigmoid, $\beta = 1$	100	<1	34.1149
2	8	Sigmoid, $\beta = 1$	49	<1	34.1166
2	8	Sigmoid, $\beta = 2$	47	<1	34.1165
2	8	Sigmoid, $\beta = 5$	45	<1	34.1168
2	8	Sigmoid, $\beta = 10$	48	<1	34.1168
2	8	Sigmoid, $\beta = 11$	48	<1	34.1166
2	8	Sigmoid, $\beta = 12$	48	<1	34.1164
3	8	Sigmoid, $\beta = 1$	47	<2	34.1166
3	8	Sigmoid, $\beta = 2$	43	<2	34.1168
3	8	Sigmoid, $\beta = 5$	38	<2	34.1169
3	8	Sigmoid, $\beta = 10$	38	<2	34.1193
2	8	tanh	49	<1	≈ 0
3	8	tanh	47	<2	≈ 0
2	8	ReLU	49	<1	0
3	8	ReLU	47	<2	0

\*The duration of computing is conditional; it depends on the computer equipment's power

Table 2 shows the results of using the considered neural network options for the number of hidden layers and neurons with the sigmoid activation function. Table 3 gives the results of using the different considered ANN options including the number of hidden layers, neurons, and the different activation functions – sigmoid with

various  $\beta$  values, hyperbolic tangent (tanh) and rectifying (ReLU) ones. The results of using a dropout algorithm for training the considered ANN options are given in Table 4.

Table 4. Results of using a dropout algorithm for training the considered ANNs by randomly dropping units during training

The number of:		Dropping units in hidden layers:	The number of learning epochs	$\bar{C}_p, m^{1/2}/s$
hidden layers	neurons $m$			
1	4	not applied	100	34.1149
1	8	applied	155	31.3485
1	16	applied	125	33.3661
2	8	not applied	49	34.1166
		applied, but separately for each layer	53	30.1830
		applied, same for all layers	53	30.7412
		applied, but only for the first hidden layer	45	34.1177
2	16	not applied	24	34.1166
		applied, but separately for each layer	25	31.1932
		applied, same for all layers	25	31.4216
		applied, but only for the first hidden layer	21	34.1187
3	8	not applied	47	34.1166
		applied, but separately for each layer	60	31.2421
		applied, same for all layers	55	31.2433
		applied, but only for the first hidden layer	43	34.1168
3	16	not applied	18	34.1170
		applied, but separately for each layer	30	33.9920
		applied, same for all layers	18	33.8473
		applied, but only for the first hidden layer	16	34.1140

For all the considered ANNs (Table 4), the sigmoid activation function (3) was applied. The learning factor was 0.002.

### 5. Discussion

Analysing the results, it can be emphasised that the standard hyperbolic tangent (tanh) and rectifying (ReLU) activation functions appeared to be irrelevant for approximating the Chézy coefficient according to the computing model of (1) and (2). In this case, additional settings and modifications are needed to use these functions to obtain the desired results when calculating the Chézy roughness coefficient. This task may be the aim of future research.

The increase in the number of hidden layers and neurons contributes to the fact that the neural network within the model of (1) and (2) learns faster (the number of learning epochs tends to decrease). However, this practically did not affect the results of the Chézy coefficient computing.

To approximate the Chézy roughness coefficient function  $C = f(x_1, x_2)$ ,  $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$ ,  $x_2 \in \{h, R\}$  [22], it may be enough to use the fully connected ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. In particular, in this case study, the Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient

(NSE) varied between 0.94-0.98. It can signify the forecast (predictive) skill of the ANN is quite high.

In turn, the relative prediction errors  $E_r$  (%) of forecasting water discharges varied between 0.9-13.9% depending on rivers and river channel sections (Table 1), where:

$$E_r = \frac{|Q_o - Q_p|}{Q_o} \cdot 100\%, \quad (12)$$

where  $Q_o$  and  $Q_p$  are the observed and predicted values of water discharges. It may also indicate the high performance of the ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function [22] in computing the Chézy roughness coefficient as an integral empirical characteristic of hydraulic resistance to open flows in river channels [21].

In addition, in applying the sigmoid activation function, the accuracy of forecasting the Chézy coefficient values was determined using the relative prediction errors  $E_r$  (%):

$$E_r = \frac{|\bar{c}_o - \bar{c}_p|}{\bar{c}_o} \cdot 100\%, \quad (13)$$

where  $\bar{c}_o$  is the average observed (identified) value and  $\bar{c}_p$  is the average predicted value of Chézy's coefficient.

When using the sigmoid logistic activation function, the relative prediction errors of forecasting the Chézy coefficient values varied between 3.56-3.58% depending on the considered ANN options. Thereby, the answer to the question of whether we need to develop a more sophisticated multilayer artificial neural network to compute Chézy's roughness coefficient may be the next. When applying the computing model of  $C = f(x_1, x_2)$ ,  $x_1 \in \{n, \Delta, S_f, B\}$ ,  $x_2 \in \{h, R\}$  [22], it is recommended to use the ANN options of direct propagation with one or two hidden layers and a sigmoid activation function. More important in this case may be the formation of a qualitative set of training data.

## 6. Conclusions

Under the study, to explore the necessity of developing more sophisticated multilayer artificial neural networks to compute Chézy's coefficient, the following modifications of the neural computing were considered and analysed: (1) Application of two hidden layers of neurons; (2) Application of three hidden layers of neurons; (3) Use of a dropout algorithm for training neural networks by randomly dropping units during training to prevent their co-adaptation; (4) Apart from the sigmoid (logistic) activation function, the use of other artificial neuron transfer functions (activation functions) – hyperbolic tangent (tanh) and rectifying activation function (ReLU – Rectified Linear Unit). The training and testing of the considered neural network options were carried out using the actual hydro-morphological and hydrological data related to the channel section on the Dnieper River (downstream of Kyiv), the Desna River section near Chernihiv, and the Pripjat River section near Turiv.

The test results confirm the acceptability and sufficiency of computing the Chézy roughness coefficient using the ANN of direct propagation with one hidden layer and a sigmoid logistic activation function. The formation of a qualitative set of training data, as well as data arrangement and choosing a relevant computing model based on empirical knowledge, as revealed, are among more actual issues than creating more sophisticated neural networks.

## REFERENCES

1. Zadeh, L.A. (1994). Fuzzy logic, neural networks and soft computing. *Fuzzy Systems. Communications of the ACM*, Vol. 37, No. 3, 77–84.
2. Ibrahim, D. (2016). An overview of soft computing. *Procedia Computer Science*, 102, 34–38. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.366>
3. Bele, S.B. (2020). The concept of soft computing. *International Journal of Recent Advances in Multidisciplinary Research*, Vol. 07, Issue 03, 5623–5625.
4. Carlos, M. (2022). Characteristics of Soft Computing and its Applications. *Int. J. of Swarm Intelligent and Evolutionary Comp.* 11:275. <https://doi.org/10.35248/2090-4908.22.11.275>
5. Soft computing approach for mathematical modeling of engineering problems. (2022). Ed. by A. Ahmadian, and S. Salahshour. CRC Press. Taylor & Francis Group, London, N.Y., 203 p.
6. Singh, Ju. (2016). A Parameterized Comparison of Fuzzy Logic, Neural Network and Neuro-Fuzzy System: A Literature. *International Journal of Computer Science and Mobile Computing*, Vol. 5, Issue 5, 478-482.
7. Thakur, A., Dhiman, K., and Phansikar, M. (2021). Neuro-Fuzzy: Artificial Neural Networks & Fuzzy Logic. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, Vol. 9, Issue IX, 128-135.
8. Haghbin, M., Sharafati, A., Motta, D. et al. (2021). Applications of soft computing models for predicting sea surface temperature: a comprehensive review and assessment. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8:4. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00400-9>
9. Adnan, R.M., Meshram, S.G., Mostafa, R.R., et al. (2023). Application of Advanced Optimized Soft Computing Models for Atmospheric Variable Forecasting. *Mathematics*, 11, 1213. <https://doi.org/10.3390/math11051213>
10. Pham, B.T., Nguyen, M.D., Al-Ansari, N. et al. (2021). A Comparative Study of Soft Computing Models for Prediction of Permeability Coefficient of Soil. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2021, 7631493. <https://doi.org/10.1155/2021/7631493>
11. Redjimi, H., and Tar, J.K. (2021). A Simple Soft Computing Structure for Modeling and Control. *Machines*, 9, 168. <https://doi.org/10.3390/machines9080168>
12. Afaq, H., and Saini, S. (2011). Swarm Intelligence based Soft Computing Techniques for the Solutions to Multiobjective Optimization Problems. *International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, Issue 3, No. 2, 498-510.
13. Soft Computing: Recent Advances and Applications in Engineering and Mathematical Sciences. (2023). Edited by P. Debnath, O. Castillo, and P. Kumam. CRC Press. Taylor & Francis Group, London, N.Y., 233 p.
14. Haikin, S. (2008). *Neural Networks and Learning Machines* (3rd Edition), Prentice Hall, 906 p.
15. Choi, R.Y., Coyner, A.S., Kalpathy-Cramer, J., Chiang, M.F., and Campbell, J.P. (2020). Introduction to machine learning, neural networks, and deep learning. *Trans Vis Sci Tech., Special Issue*, Vol. 9, No. 2, Article 14:2. <https://doi.org/10.1167/tvst.9.2.14>
16. Taye, M.M. (2023). Understanding of Machine Learning with DeepLearning: Architectures, Workflow, Applications and Future Directions. *Computers*, 12, 91. <https://doi.org/10.3390/computers12050091>

17. Russell, S.J., and Norvig, P. (2010). Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Pearson Education, Inc.: Upper Saddle River, New Jersey, 1132 p.
18. Dhar, V. (2013). Data science and prediction. Communications of the ACM 56 (12): 64. <https://doi.org/10.1145/2500499>
19. Zhang, G., Patuwo, B.E., Hu, M.Y. (1998). Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. International Journal of Forecasting, 14, 35–62. [https://doi.org/10.1016/S0169-2070\(97\)00044-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2070(97)00044-7)
20. Montaña Moreno, J.J., Pol, A.P., and Gracia, P.M. (2011). Artificial neural networks applied to forecasting time series. Psicothema, Vol. 23, No 2, 322–329.
21. Stefanyshyn, D.V., Khodnevykh, Y.V., Korbutiak, V.M. (2021). Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcoming. Environmental safety and natural resources, 39(3), 16–43. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43>
22. Khodnevykh, Y.V., Stefanyshyn, D.V. (2022). Data arrangements to train an artificial neural network within solving the tasks for calculating the Chézy roughness coefficient under uncertainty of parameters determining the hydraulic resistance to flow in river channels. Environmental safety and natural resources, 42(2), 59–85. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.59-85>
23. Chollet, F. (2018). Deep Learning with Python. Manning Publications Co., 384 p.
24. Trask, A.W. (2019). Grokking Deep Learning. Manning Publications Co., 336 p.
25. Cybenko, G.V. (1989). Approximation by Superpositions of a Sigmoidal function. Mathematics of Control, Signals and Systems, Vol. 2, No. 4, 303–314.
26. Keim, R. (2020). How Many Hidden Layers and Hidden Nodes Does a Neural Network Need? Available from <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-many-hidden-layers-and-hidden-nodes-does-a-neural-network-need/>
27. Baldi, P., and Sadowski, P. (2014). The dropout learning algorithm. Artificial Intelligence, 210, 78–122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.artint.2014.02.004>
28. Nielsen, M. Neural Networks and Deep Learning, 224 p. Available from <https://static.latexstudio.net/article/2018/0912/neuralnetworksanddeeplearning.pdf>
29. Brownlee, J. (2019). A Gentle Introduction to the Rectified Linear Unit (ReLU). In Deep Learning Performance. Available from <https://machinelearningmastery.com/rectified-linear-activation-function-for-deep-learning-neural-networks/>
30. Muller, A., and Guido, S. (2016). Introduction to Machine Learning with Python, Published by O'Reilly Media, 378 p.
31. Khodnevykh, Ya. (2022). The software implementation of a neural network computational algorithm for predicting the Chézy roughness coefficient. Available from [https://github.com/yakhodnevykh/ANN\\_approximation\\_C](https://github.com/yakhodnevykh/ANN_approximation_C)
32. Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles, Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

*The article was received 05.09.2023 and was accepted after revision 29.11.2023*

### **Я.В. Ходневич, Д.В. Стефанишин**

### **Чи потрібна нам більш складна багатoshарова штучна нейронна мережа для обчислення коефіцієнта шорсткості?**

**Анотація.** Штучні нейронні мережі є однією з найбільш швидко зростаючих областей м'яких обчислень. Поряд з глибоким навчанням вони натеper широко використовуються при машинному навчанні. Нейронні мережі особливо підходять для вирішення завдань, де досліднику доводиться мати справу з неповними наборами даних і відсутні алгоритми або специфічні набори правил, яких слід дотримуватися.

У статті розглядається порівняння декількох модифікацій нейронних мереж, які можуть застосовуватися для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі. Моделювання нейронної мережі часто починається з одного прихованого шару. Навіть з одним

прихованим шаром нейронна мережа є потужною обчислювальною системою, яка може дати хороші результати. При необхідності кількість прихованих шарів може збільшуватися. Зазвичай використовуються два або три прихованих шари нейронів. Також можуть застосовуватися різні функції активації. Ця стаття має на меті дослідити, чи потрібно розробляти більш складну нейронну мережу для практичних обчислень коефіцієнта шорсткості Шезі.

В рамках проведеного дослідження було розглянуто та проаналізовано наступні модифікації нейронної мережі, яка обчислює коефіцієнт шорсткості Шезі: (1) застосування двох прихованих шарів нейронів; (2) застосування трьох прихованих шарів нейронів; (3) використання dropout алгоритму для навчання нейронних мереж шляхом випадкового скидання одиниць під час навчання, щоб запобігти їх спільній адаптації; (4) крім сигмоїдної (логістичної) функції активації – використання інших функцій – гіперболічного тангенса (tanh) і випрямляючої функції активації (ReLU).

Навчання та тестування розглянутих варіантів нейронної мережі проводилося з використанням фактичних гідро-морфологічних та гідрологічних даних на ділянках русла на річці Дніпро (нижче за течією Києва), річки Десна біля Чернігова та ділянки річки Прип'ять поблизу м. Турів. Для побудови та навчання нейронних мереж було застосовано об'єктно-орієнтоване середовище програмування Python. Отримані результати показують, що для обчислення коефіцієнта шорсткості Шезі може бути достатнім використовувати ШНМ прямого поширення з одним прихованим шаром і сигмоїдною функцією активації. Формування якісного набору навчальних даних, а також організація даних і вибір відповідної обчислювальної моделі, заснованої на емпіричних знаннях, є в цьому випадку однією з більш актуальних проблем, ніж створення більш складних нейронних мереж.

**Ключові слова:** функції активації; штучні нейронні мережі; коефіцієнт Шезі; порівняння; dropout алгоритм; приховані шари; модифікації; нейрони.

*Стаття надійшла до редакції 05.09.2023 і прийнята до друку після рецензування 29.11.2023*

#### **Ходневич Ярослав Васильович**

кандидат технічних наук, науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5510-1154> **e-mail:** [ya.v.khodnevych@gmail.com](mailto:ya.v.khodnevych@gmail.com)

#### **Стефанишин Дмитро Володимирович**

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ

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

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7620-1613> **e-mail:** [d.v.stefanyshyn@gmail.com](mailto:d.v.stefanyshyn@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 26.12.23 Формат 70x108/16. Папір офсетний.  
Офсетний друк. Умовн. друк. арк. 16.1  
Обл.-вид. арк. 11.95  
Замовлення № \_\_\_\_\_

Тираж 300 примірників

---

КИЇВ 2023